

Ehituse ja arhitektuuri instituut Liginullenergiahoonete uurimisrühm

SEESPOOLSE LISASOOJUSTUSEGA RISTKIHTLIIMPUIDUST SEINTE SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISE TOIMIVUSE HINDAMINE

HYGROTHERMAL PERFORMANCE OF CROSS-LAMINATED TIMBER WALLS WITH INTERIOR INSULATION

MAGISTRITÖÖ

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

Autor:	

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

Juhendaja: / allkiri /

Kaitsmisele lubatud

Kaitsmiskomisjoni esimees / nimi ja allkiri /

Ehituse ja arhitektuuri instituut Liginullenergiahoonete uurimisrühm

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane:	Annegrete Külaots, 131875
Õppekava, peaeriala:	EAEI ehitustehnika
Juhendaja(d):	professor, Targo Kalamees, 620 2403;
	doktorant-nooremteadur, Villu Kukk, 620 2402

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Seespoolse lisasoojustusega ristkihtliimpuidust seinte niiskustehnilise toimivuse hindamine

(inglise keeles) Hygrothermal performance of cross laminated timber walls with interior insulation

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Erinevate omadustega seespoolse soojustuse mõju hindamine tarindi niiskustehnilise toimivusele;

2. Seinatarindite kohta täpse arvutusmudeli koostamine;

3. Maksimaalse paneeli algniiskuse leidmine tarindis hallitusindeksi abil;

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Esialgsete simulatsioonide teostamine katseseinte tarindilahenduse valimiseks	30.11.17
2.	Katseseinte ehitus ja paigaldus kliimakambrisse; katse käivitamine	15.01.18
3.	Katsetulemuste analüüs ning andmetöötlus	23.04.18
4.	Arvutusmudelite koostamine	30.04.18
5.	Katse ja arvutustulemuste võrdlus	18.05.18
6.	Lõputöö vormistamine	28.05.18

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "31 "mai 2018.a

Üliõpilane: Annegrete Külaots

/allkiri/

Juhendaja: professor Targo Kalamees

/allkiri/

/allkiri/

SISUKORD

S	ISL	JKO	RD.		4
K	OK	κυν	√ÕTI	E	6
S	UN	1MA	RY.		7
1.		EE	SSÕ	NA	8
2.		MÕ	ISTE	ETE JA TÄHISTE LOETELU	9
	2.	1	Mõi	sted	9
	2.2	2	Täh	ised	11
3.		SIS	SEJ	UHATUS	14
	3.	1	CLT	ehitusmaterjalina	14
	3.2	2	CLT	soojuslikud ja niiskuslikud omadused	15
	3.:	3	See	spoolne soojustamine	16
	3.4	4	Ehit	usniiskus tarindis	18
	3.	5	Vara	asemalt läbi viidud uurimused	19
	3.0	6	Uur	imistöö eesmärk	21
4.	3.0	6 ME	Uuri ETO	imistöö eesmärk	21 23
4.	3.0 4.1	6 ME 1	Uuri ETO Kats	imistöö eesmärk DID semetoodika	21 23 23
4.	3.0 4.1	6 ME 1 4.1.	Uuri ETO Kats	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad	21 23 23 24
4.	3.0 4.1	6 ME 1 4.1. 4.1.	Uuri ETO Kats .1	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid	21 23 23 24 30
4.	3.0 4.1	6 ME 1 4.1. 4.1.	Uuri ETO Kats .1 .2 .3	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond	21 23 23 24 30 31
4.	3.0 4.1 4.2	6 ME 4.1. 4.1. 4.1.	Uuri ETO Kats .1 .2 .3 Arvu	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond	21 23 23 24 30 31 34
4.	3.0 4.1 4.2	6 ME 4.1. 4.1. 2 4.2.	Uuri ETO Kats 1 .2 .3 Arvu	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond utusmetoodika Arvutustarkvara	21 23 23 24 30 31 34 34
4.	3.0 4.1 4.2	6 ME 4.1. 4.1. 2 4.2. 4.2.	Uuri ETO Kats .1 .2 .3 Arvu .1 .2	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond utusmetoodika Arvutustarkvara Modelleerimise metoodika	21 23 23 24 30 31 34 34 40
4.	3.04.14.2	6 ME 1 4.1. 4.1. 2 4.2. 4.2.	Uuri ETO Kats 1 .2 .3 Arvu .1 .2 .3	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond utusmetoodika Arvutustarkvara Modelleerimise metoodika Hindamiskriteeriumid	21 23 23 24 30 31 34 34 34 40 44
4.	3.0 4.1	6 ME 4.1. 4.1. 4.2. 4.2. 4.2. TUI	Uuri ETO Kats 1 .2 .3 Arvu .1 .2 .3	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond Juusmetoodika Arvutustarkvara Modelleerimise metoodika Hindamiskriteeriumid USED JA TULEMUSTE HINDAMINE	21 23 23 24 30 31 34 34 40 44 47
4.	 3.0 4.1 4.2 5.1 	6 ME 4.1. 4.1. 4.2. 4.2. 4.2. 1	Uuri ETO Kats .1 .2 .3 Arvu .1 .2 .3 .1 .2 .3 Kats	imistöö eesmärk DID semetoodika Katseseinad Mõõtevahendid Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Mõõtevahendid Mõõtevahendid Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Mõõtevahendid Mõõtevahendid Mõõtevahendid Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Mõõtevahendid Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Katsekeskkond Juse Setulemused ja nende hindamine	21 23 23 24 30 31 34 34 40 47 47 47

	5.2.1	Katseseina CLT13MW mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega52
	5.2.2	Katseseina CLT13PIR mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega58
	5.2.3	Katseseina CLT20MW mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega63
	5.2.4	Katseseina CLT20PIR mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega68
5.	.3 CLT	F-paneeli maksimaalse algniiskuse määramine tarindis
	5.3.1	Arvutusperioodi algusaja määramine74
	5.3.2	CLT-paneeli maksimaalse algniiskuse määramine tarindis76
6.	TULEM	USTE ANALÜÜS 80
7.	JÄREL	DUSED
8.	KASUT	ATUD KIRJANDUS
LISA	A 1	
LISA	۹ 2	
LISA	۹ 3	
LISA	۸ 4	

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö raames on uuritud seespoolse lisasoojustusega ristkihtliimpuitpaneelidest *(cross-laminated timber,* CLT*)* seinte niiskustehnilist toimivust erineva puidu niiskussisalduse korral. Eesmärgiks oli välja selgitada puitpaneelide maksimaalne lubatav algniiskus ning koostada kalibreeritud arvutusmudel niiskustehniliste arvutuste tegemiseks. Uurimuse käigus ehitati katselaboris neli katseseina, millest kahes oli seespoolse lisasoojustusena kasutatud Isover Vario InLiner soojustusmaterjali ning ülejäänud kahes Kingspan Therma TP10 soojustust. Neljast katseseinast kahte paigaldati kuivad CLT-paneelid ning teistesse eelnevalt niisutatud paneelid. Erineva niiskusega paneele mõlema seinakonstruktsiooni tarbeks kasutati, et võrrelda arvutuste vastavust katsetulemustega. Katseseinad paigaldati Tallinna Tehnikaülikooli laboris olevasse kliimakambrisse ning 86 päeva pikkuse katseperioodi vältel registreeriti andurite abil tunniajase intervalliga suhtelise niiskuse ning temperatuuriandmed katseseinte kihtides.

Puittarindi niiskustehnilise toimivuse seisukohalt on oluline vältida liigniiskuse tõttu puidu pinnal tekkivat hallituse kasvu. Hallituse tekke vältimist kasutati kriteeriumina tarindi niiskustehnilisele toimivusele hinnangu andmisel. Hallituse tekkeohtu tarindis hinnati hallitusindeksi abil. Väliskliima ääretingimustena kasutati Väike-Maarja 1989-90 aasta kliimaandmeid (hallituse testaasta) ning sisekliima puhul on kasutatud standardis EVS-EN ISO 13788:2012 toodud niiskusklass 3 vastavat siseõhu niiskuslisa suurusega 6g/m³ ning (Ilomets, Kalamees, & Vinha, 2017) poolt esitatud keskmisi sisetemperatuuri 1°C võrra alandatud väärtuseid. Lisaks selgitati välja ka mõlema tarindilahenduse jaoks kriitiliseim arvutusperioodi algusaeg.

Kliimakambri katsetulemuste põhjal korrigeeritud arvutusmudelitega teostatud arvutustulemustest selgus, et Isover Vario InLineriga seestpoolt soojustatud tarindi maksimaalseks lubatud algniiskuseks on 17% ning Kingspan Therma TP10-ga soojustatud tarindis 15%, mille korral on tarindid niiskustehniliselt toimivad. Muutuva difusioonitakistusega kihiga Isover InLineriga seestpoolt soojustatud tarind on katse- ja arvutustulemuste põhjal niiskustehniliselt ohutum lahendus kui Kingspan Therma TP10-ga seestpoolt soojustatud tarind. Arvutustulemustest selgus ka, et Isover Vario InLiner soojustuse puhul kujunes ohtlikuimaks arvutusperioodi algusajaks detsember, samal ajal kui Kingspan Therma TP10 soojustusmaterjali puhul saadi kõige kriitilisemad tulemused alustades arvutusperioodi augustist.

SUMMARY

This master's thesis incorporates a research which concentrates on studying the hygrothermal performance of cross-laminated timber (CLT) walls with exterior and additional interior insulation and with different initial moisture content of the panels. The purpose of this research is to create and validate a simulation model of the testwalls for hygrothermal calculations and to find out the allowed initial moisture content of this sort of structure. During the research four testwalls with two different structures were built. The difference in structures lied between the type of additional interior insulation used and in initial moisture content of the panels. In two testwalls previously wetted CLT-panels were installed and the other walls consisted of unwetted CLT-panels. CLT-panels with different moisture content were used to better evaluate the accuracy of the constructed simulation model compared to the results of the experiment. The testwalls were installed in the climate chamber located in a laboratory in Tallinn University of Technology (TUT) and during the 86-day test period data of relative humidity and temperature in different layers of the testwalls were collected.

For the hygrothermal safety of the structure, it is important to avoid mould growth caused by the excess moisture in the structure. Mould growth is calculated by using the mould index. The mould index is used in this thesis to evaluate the moisture safety of the testwalls. Väike-Maarja 1989-90 climate data was used as outside boundary condition. For indoor boundary conditions, moisture class 3 from EVS-EN ISO 13788: 2012 with 6 g/m³ moisture excess and 1°C lower average indoor temperature values presented by (Ilomets et al., 2017) were used in the calculations. Additionally, the most critical starting time for the calculation period was also found out for both wall structures.

The results from the validated calculation models showed that the maximum initial moisture allowed in the CLT-panels is 17% for envelopes that were internally insulated with Isover Vario InLIner insulation. For envelopes, where Kingspan Therma TP10 insulation material was used as an interior insulation, the maximum value for initial moisture in CLT-panels is 15%. The results received from both measurements and calculations show that using Isover Vario InLiner material as an interior insulation in tested wall envelope is hygrothermally safer solution than using Kingspan Therma TP10 insulation for this sort of structure. It was revealed that for walls which were insulated with Isover Vario InLiner the highest mould index results were received when starting the calculation period from december. For walls insulated with Kingspan Therma TP10 insulation materials, august was the most critical time to start the calculation period.

1. EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema ettepaneku ja probleemipüstituse koostajaks on Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna professor Targo Kalamees. Töö on koostatud ehituse ja arhitektuuri instituudi liginullenergiahoonete uurimisrühma uurimisteema ühe osana. Uurimustöös on keskendutud CLT-paneelidest seinte niiskustehnilise toimivuse uurimisele seespoolse ja välispidise soojustuse korral.

Magistritöö jaoks vajalikud andmed on kogutud kliimakambris teostatud katse ning arvutusmudelite koostamise abil. Uurimustöös kajastatud katseandmed on kogutud Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 asuvas ehituskonstruktsioonide teadus- ja katselaboratooriumis. Kirjeldatud on esmaste simulatsioonide teostust, valitud katseseinte ehitamisprotsessi, katse käiku ning arvutusmudelite koostamise metoodikat. Tulemused on jagatud kaheks osaks: katsetulemuste hindamine ning katse- ja arvutustulemuste võrdlus.

Uurimustöö valmimisele aitasid nõu ja jõuga kaasa juhendaja professor Targo Kalamees ning kaasjuhendaja doktorant-nooremteadur Villu Kukk. Katseseinte ehitamise tarbeks varustas CLT-paneelidega Peetri Puit OÜ ning seinte ehitamisel ja paigaldamisel olid suureks abiks puidutehnoloogia magistriõppe tudengid Adeniyi Bella ning Laura Cukkere.

Võtmesõnad: CLT, ehitusniiskuse väljakuivamine, seespoolne lisasoojustus, kriitiline niiskus.

2. MÕISTETE JA TÄHISTE LOETELU

2.1 Mõisted

CHAMPS (tõlkes *coupled heat, air, moisture, pollutant simulation või heat, air, moisture, pollutants and salt transport*) - füüsikaline mudel kombineeritud soojuse, õhu, niiskuse ning saasteainete simulatsiooni koostamiseks, mis sisaldab endas mitmeid osatuletistega võrrandeid ning mille lahendamisel kasutatakse lõplike elementide meetodit

Entalpia *h*, J (*enthalpy*) – termodünaamilise süsteemi siseenergia ja rõhuenergia summa

Ehitusniiskus – ehitusdetailidesse või -materjalidesse ehitamise käigus või enne seda sattunud ehitise või tarindiosa kasutusaegset tasakaaluniiskust ületav niiskus

Kondensatsioon e kondenseerumine – aine üleminek gaasilisest olekust vedelasse olekusse

Kriitiline pinnaniiskus (*critical surface humidity*) – suhteline niiskus (või/ja sellele vastavat materjali niiskussisaldust massi- või mahuprotsentides) pinnal, mille ületamine põhjustab niiskuskahjustusi, sh pinnaseisundi halvenemist, mikroobset kasvu (eriti hallituse arengut), veeauru kondenseerumist või materjali keemilist lagunemist

Netonullenergiahoone – hoone, mille energitatõhususarv on 0 kWh/(m²·a)

Niiskusklass – Hoonete ja ruumide jaotus arvutusliku niiskuslisa järgi sõltuvalt hoone või ruumi kasutusotstarbest ning asustustihedusest

Niiskuspaisumine - materiali mõõtmete muutumine tema niiskussisalduse muutumisel

Piirdetarind (*building fabric, building envelope*) – ehitise põhiosa või piire, nagu sein, põrand, vahelagi, uks, aken, katus, mis eraldab ruumi teisest ruumist, välisõhust või pinnasest. Ingliskeelset mõistet *building envelope* kasutatakse konkreetsemalt välispiirdetarindite kohta

Piirdetarindi kogusoojustakistus *Rtot*, m²·K/W (*total thermal resistance*) – piirdetarindi üksikute kihtide arvutuslike soojustakistuste ning sise- ja välispindade soojustakistuste summa

9

Ristkihtliimpuit (CLT) (cross laminated timber, X-Lam) – puidust konstruktsioonimaterjal, mis koosneb vähemalt kolmest omavahel 90° nurga all paigutatud kihist, millest vähemalt kaks kihti on puidust

Siseõhu niiskuslisa $\Delta \nu$, **(g/m³)** *(internal moisture excess)* – siseõhu ja välisõhu veeaurusisalduste erinevus, mis sõltub niiskustootlusest ruumis, ruumi õhuvahetuskordsusest ja ruumi mahust $\Delta \nu = \nu_i - \nu_e = G/(n \cdot V)$

Soojuspaisumine – materjali mõõtmete muutumine temperatuuri muutumisel.

Soojustus (ka soojustusmaterjal, soojusisolatsioonimaterjal) (thermal insulation) – materjalikiht soojuslevi oluliseks takistamiseks

Soojusvool $\boldsymbol{\phi}$, **W=J/s** (*heat flow rate*) – soojushulk, mis kandub ajaühikus läbi vaadeldava pinna

Soojusvoog q, W/m² (heat flux) – soojusvool vaadeldava pinna pindalaühiku kohta

Soojuserijuhtivus λ , **W/(m·K)** (*thermal conductivity*) – materjali omadus, mis väljendab soojusvoolu vattides, mis läbib ühe meetri paksuse ja ühe ruutmeetrise pinnaga materjalikihi, kui temperatuuride vahe vastastikuste pindade vahel on 1 K.

Soojusjuhtivus – materjali omadus spontaanne kandumine kuumemalt kehalt (või kehaosalt) külmemale kehale (kehaosale)

Soojusläbivus *U*, *WI*(m²·K) (*thermal transmittance*) – tarindi omadus, mis väljendab soojusvoolu läbi 1 m² pinnaga tarindi, kui temperatuuride vahe eri keskkondade vahel on 1 K; arvutatav valemitest $U = \frac{\Phi}{(T_1 - T_2) \cdot A}$; $U = \frac{1}{R_{tot}}$. Mitteehituslikus kasutuses on tarvitusel ka termin "soojusläbikandetegur" ja ajalooliselt on kasutuses olnud termin "soojusjuhtivus" (*thermal conductance*)

Soojustakistus *R*, m²·K/W (thermal resistance) – kindla paksusega toote või elemendi omadus takistada soojuse voogu (üldiselt soojusläbivuse teel) läbi toote või elemendi (pinnalt pinnale) statsionaarsetes tingimustes ja on arvutatav valemitest $R = \frac{T_1 - T_2}{a}$, $R = \frac{d}{\lambda}$

Suhteline difusioonitakistus ehk veeauru difusioonitakistusega võrdne õhukihi paksus s_d , m (water vapour diffusion- equivalent air layer thickness) – liikumatu õhukihi paksus, millel on sama veeaurutakistus kui kõnealusel materjalikihil: $s_d = \mu \cdot d$

Suhteline niiskus φ , **RH**, % (*relative humidity*) – veeauru osarõhu ja veeauru küllastusrõhu suhe samal temperatuuril: $\varphi = \frac{p}{p_{rat}} = RH$

Veeauru difusioon (water vapour diffusion) – veeaurumolekulide liikumine õhus ühtlustamaks veeaurusisaldust õhus ja veeauru osarõhku püsiva õhurõhu tingimustes

Veeauru difusioonitakistustegur μ , - (water vapour resistance factor) – väljendab materjali takistuse erinevust võrrelduna sama paksu paigalseisva õhukihiga samal temperatuuril. Veeauru difusioonitakistustegur leitakse, kui õhu veeaurujuhtivus difusiooni teel, D jagatakse poorse materjali veeauru erijuhtivusega δ_{v} ; $\mu = \frac{D}{\delta_{v}}$

Veeauru osarõhk *p*, **Pa** (*partial water vapour pressure*) – veeauru osarõhk gaasisegus. Küllastumisel kasutatakse tähisel vastavat allindeksit p_{sat} (veeauru küllastusrõhk)

VOC (volatile organic compounds) – tõlkes "lenduvad orgaanilised ühendid" on keemilised ühendid, mis tavatingimustes märkimisväärselt lenduvad atmosfääri

2.2 Tähised

M-hallitusindeks, [-]

SQ - materjali pinnakvaliteeti iseloomustav tegur, [-]

T – temperatuur, [°C]

W-puiduliiki iseloomustav tegur, [-]

 $D_{v,air}(T)$ – seisva õhu veeaurujuhtivus [m²/s]

K_a – materjali gaasiläbivus [s]

K_l - veejuhtivus [s]

- R_1 , R_2 , R_n iga materjalikihi soojustakistus, [(m²K)/W]
- R_a- universaalne gaasikonstant [J/(kg·K)];

 R_v – veeauru gaasikonstant [J/(kg·K)];

- R_{se} piirde välispinna soojustakistus, [(m²K)/W]
- R_{si} piirde sisepinna soojustakistus, [(m²K)/W]
- RH_{crit} kriitiline suhteline niiskus, [%]

t – aeg, nädalates

- d materjalikihi paksus, [mm]
- g Maa gravitatsioonikonstant e raskuskiirendus, [m/s²]

 $c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}}$ on vee kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg]

- $c_l^{m_{voc}}$ on lenduvate orgaaniliste ühendite (*volatile organic compound* VOC) kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg]
- h_v veeauru entalpia [J/kg]
- $h_{voc,g}$ lenduvate orgaaniliste osakeste entalpia [J/kg]
- $j_{conv}^{m_w}$ on vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)]
- $j_{conv}^{m_v}$ on veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)]
- $j_{diff}^{m_v}$ on veeauru diffuusse liikumise voog [kg/(m²·s)]
- $j_{conv}^{m_l} = -K_l \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right]$ on konvektiivne voog vedelikus [kg/m²·s)]
- j^Q_{diff} soojusenergia voog [W/m²]
- $j_{conv}^{m_l}$ vee konvektiivse liikumise voog [W/m²]
- $j_{conv}^{m_g}$ gaasi konvektiivse liikumise voog [W/m²]
- $j_{diff}^{m_v}$ veeauru difuusse liikumise voog [W/m²]
- $j_{diff}^{m_{voc,g}}$ lenduvate orgaaniliste ühendite (VOC) difuusse liikumise voog [W/m²]
- p_l veerõhk [Pa]
- u_l vee eri siseenergia [J/kg]
- ug gaasi eri siseenergia [J/kg]
- ρ_l vee tihedus [kg/m³]
- $\rho_{REV}^{m_{w+v}}$ on koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus [kg/m³]
- ρ_{REV}^U siseenergia tihedus [J/m³]
- $\sigma_{REV}^{m_{w+v}}$ on niiskuslisa/ -kadu antud ruumalaühiku kohta [kg/(m³·s)]
- σ_{REV}^{U} energia muutumise suurus antud ruumalaühikus [W/m³s]
- μ difusioonitakistustegur [-]
- $\eta_w(T)$ puhta vee viskoossus
- $\eta_{voc}(T) \text{VOC viskoossus}$
- θ_q gaasi maht ruumalaühikus [m³/m³]

 θ_{por} – materjali poorsus [m³/m³]

 θ_l – vee maht ruumalaühikus [m³/m³]

3. SISSEJUHATUS

3.1 CLT ehitusmaterjalina

Ristkihtliimpuit massiivse puitelemendina on võrdlemisi uus materjal puithoonete ehituses. Selle arendamisega on tegeletud 1990-ndate aastate algusest alates Saksamaal ja Austrias ning on ehitusmaterjalina Euroopas populaarsust kogunud nii erakui ühiskondlike hoonete ehituses. Ristkihtliimpuitu kasutatakse hoonete ehituses peamiselt seina- ja vahelaekonstruktsioonide rajamisel ning materjali kasutamine hakkas märkimisväärselt kasvama 2000-ndate aastate alguses. (Karacabeyli & Brad, 2013)

Ristkihtliimpuitpaneelid koosnevad paaritust arvust kihtidest, reeglina on paneelid 3- kuni 9-kihilised. Standardi EVS-EN 16351:2015 kohaselt peab kihtide valmistamisel olema kasutatud Euroopa standardi EN 14081-1 kohaselt tugevussorteeritud puitu. Ristkihtliimpuidu üksikute kihtide paksus jääb vahemikku 6-60 millimeetrit, kogupaksus võib ulatuda kuni 500 millimeetrini. CLT-paneelide valmistamisel kasutatakse peamiselt kuusepuitu, harva ka männipuitu ning kihtide ühendamiseks kasutatakse liimi. Näited CLT-paneeli ristlõigete kohta on toodud joonisel 3.1 (EVS-EN 16351:2015)



Joonis 3.1. 5-kihilise (vasakul) ja 3-kihilise (paremal) CLT-paneeli ristlõige (Karacabeyli & Brad, 2013)

CLT-paneelide mõõtmete valik on erinev, kuid paneelide laiused sõltuvalt tootmisest on 0.6 m, 1.2 m, 2.4 m ja 3 m ning paneeli pikkus võib ulatuda kuni 18-meetrini. CLT-paneelide kasutamise eeliseks on, et paneelid valmivad tehasetoodanguna, mis läbimõeldud planeerimise korral lühendab ehitusaega, kuna ehitusobjektil toimub üksnes paneelide paigaldus. Samuti on kokkupuude ebasoodsate keskkonnatingimustega minimaalne, mistõttu on paneelide kasutamine muutumas aina populaarsemaks. (Karacabeyli & Brad, 2013)

3.2 CLT soojuslikud ja niiskuslikud omadused

Poorse ehituse tõttu on puit võrreldes teiste ehitusmaterjalidega, nagu betoon ja teras, võrdlemisi halb soojusjuht. Puidu ning ka CLT-paneelide soojuserijuhtivus (λ) on 12%-lise niiskussisalduse juures sõltuvalt puiduliigist vahemikus 0,10-0,14 W/m·K (Karacabeyli & Brad, 2013). Betooni ja terase soojuserijuhtivused on aga vastavalt 1,8 W/m·K ning 40...60 W/m·K. Madala soojusjuhtivuse tõttu tõuseb temperatuur puidus suhteliselt aeglaselt. Puidu soojusjuhtivus sõltub puidu tihedusest ja niiskusest ning on suurem pikikiudu kui ristikiudu. Soojusjuhtivus on madalam väiksema puidu tiheduse korral ning suureneb niiskussisalduse tõusuga. (Saarmann & Veibri, 2006)

Puidul on omadus soojenemisel paisuda ning jahtumisel kahaneda, kuid võrreldes puidu niiskuspaisuvusega on tema soojuspaisumine väike ning ei oma praktilist tähendust. Soojuspaisumist iseloomustab paisumistegur, mis iseloomustab puidu mõõtmete suurenemist puidu temperatuuri tõstmisel 1 °C võrra. Soojuspaisumistegur puidul temperatuurivahemikus 0...100 °C on pikikiudu 0,000006 mm/mm ning ristikiudu 0,00005 mm/mm. Vastava teguri väärtus terasel on 0,000011 mm/mm ning betoonil 0,000014 mm/mm. (Saarmann & Veibri, 2006)

Puidu niiskuseks nimetatakse puidus leiduvat vett väljendatuna protsentides tema massi kohta. Puit imab vett oluliselt kiiremini kiudude pikisuunas kui ristisuunas. Puidu rakusein suudab endasse vett imeda teatud piirini. Rakuseintes sisalduvat vett nimetatakse hügroskoopseks e. seotud veeks ning vabaks veeks e. kapillaarseks niiskuseks nimetatakse rakuõõnsustes paiknevat vett. Küllastuspunkt, mille korral puidu rakuseinad on veega täielikult täidetud sõltuvalt puuliigist ning puu erinevatest osadest on vahemikus 28...30%. Puidu niiskussisaldusest on sõltuvad ka mitmed teised puiduomadused, nagu elastsusmoodul, paindetugevus, kõvadus, survetugevus ning soojusjuhtivus. Ehituskonstruktsioonides kasutatavale puidule, mille puhul on oluline puidu tugevuslike omaduste säilimine, on sobivaks puiduniiskuseks kuni 18%. (Saarmann & Veibri, 2006)

Puidu kuivatamisel alla küllastusniiskuse, toimub rakuseintest seotud vee aurustumine, mille tagajärjel väheneb rakuseinte ruumala. Puidu kuivamisel esinev puidu kahanemine on materjali ebaühtlasest ning kiulisest ehitusest tingituna kõigis kolmes põhisuunas erinev. Puidu pikisuunaline mahumuutus kuivatamisel küllastusniiskusest absoluutselt kuiva puiduni olenevalt puiduliigist on vahemikus 0,1...0,35%. Ristisuunas on puidu mahumuutus tangentsiaal- (piki aastarõngaid) ja radiaalsuunas (risti aastarõngaid) erinev. Tangentsiaalsuunas on mahumuutus sageli ligi kaks korda suurem kui

radiaalsuunas. Kuuse- ja männipuidu puhul on tangentsiaalne mahumuutus reeglina 7-8% ning radiaalsuunaline mahumuutus ≈4%. Mahumuutuste erinevus puidu kuivamisel ja niiskumisel põhjustab puidu vormi ja kuju ebakorrapärast muutumist. (Saarmann & Veibri, 2006)

Võrreldes tavalise saepuiduga on CLT-paneeli niiskusest tingitud mahumuutused oluliselt väiksemad, kuna kõrvuti asetsevad kihid on teineteise suhtes risti ning see ühtlustab ja vähendab paneeli mahumuutusi materjali niiskumisel ja kuivamisel. (Karacabeyli & Brad, 2013)

3.3 Seespoolne soojustamine

Soojustusmaterjalid on väikese soojuserijuhtivusega ning neid kasutatakse hoone energiatõhususe tagamiseks. Tavapäraselt paigaldatakse soojustus tarindi välimisele poolele, kuid teatud olukordades kus välispidine soojustamine ei ole muinsuskaitse või muudel põhjustel võimalik, tuleb tarindi soojustehnilise toimivuse parandamiseks paigaldada soojustus välispiirde sisemisele poolele. (Arumägi et al., 2015)

On kindlaks tehtud, et puitseinte välispidise soojustamisega ei kaasne olulist seina soojus- ja niiskusrežiimi kahjustumist, samal ajal kui seespoolne soojustamine hõlmab endas niiskustehnilist riski. Võrreldes seespoolse soojustamisega on välispidise lisasoojustamise eeliseks seinapinna katmine vahelagede ning vaheseinte kohalt, samuti isoleeritakse soojustuse abil külmasillad. Projekteerijate seas on üldlevinud rusikareegliks, et Eesti kliimatingimustes on kuni 50 mm paksuse mineraalvilla kasutamine koos aurutõkkekihiga niiskustehniliselt toimivaks renoveerimislahenduseks. Erinevad uurimistulemused aga on näidanud, et antud renoveerimislahendus on niiskustehnilise toimivuse seisukohast riskantne ning tuleb eelnevalt hoolikalt läbi arvutada. (Arumägi et al., 2015)

Põhjamaistes kliimatingimustes eelpool mainitud nii sees- kui ka välispidise soojustuskihiga CLT-seinte niiskustehnilise toimivuse kohta on vastavasisulisi uurimusi vähe teostatud. Eesti tingimustes on (Kalamees et al., 2014) uurinud välispidise soojustusega kaetud CLT-paneelseina niiskustehnilist toimivust Põlvasse ehitatud netonullenergiahoones. Kuna CLT-paneelidest sein on tavalise sõrestikseinaga võrreldes massiivne ilma õõnsusteta tarind, siis kasutatavaks praktikaks on, et CLT-seina soojustehniliste ning heliisolatsiooniomaduste parandamiseks ning elektrijuhtmete mugavamaks vedamiseks paigaldatakse siseviimistlusplaadi ja CLT vahele soojustusmaterjal või jäetakse õhkvahe. Alloleval joonisel on toodud mõningad

maailmas kasutusel olevad CLT-paneelidest seinatarindite näited (vt Joonis 3.2). (Kosny et al., 2014)



Joonis 3.2. CLT-paneelseina võimalikud soojustamise variandid (Crosslam timber...) Sarnase ehitusega tarindite niiskustehnilise toimivuse uurimine, nagu on toodud joonisel 3.2, on käesoleva uurimustöö üheks põhieesmärgiks.

3.4 Ehitusniiskus tarindis

Ehitusniiskuseks nimetatakse ehitusmaterjali koostises olevat või sinna ehitusprotsessi ajal sattunud liigniiskust, mis on tingitud sademete sattumisest ja veeleketest konstruktsiooni või liigniiskete ehitusmaterjalide kasutamisest tarindis. (Othman et al., 2015)

Tarindi niiskustehniline toimivus on oluline kriteerium hoone välispiirete toimivuse tagamisel, kuna ligikaudu 75-80% juhtudest on hoones probleemide (hallituse kasv, "haige maja sündroomi" jms) põhjustajaks tarindisse sattunud liigniiskus (sh ehitusniiskus), mis võib olla tingitud keskkonnast, halvast ehituskvaliteedist, mittesobivate ehituslahenduste kasutamisest ja/või halvasti korraldatud ventilatsioonist. Liigniiskus satub puitmaterjali üldiselt ehituse ajal ilmastikutingimuste eest ebapiisava kaitse tõttu. (Othman et al., 2015)

Puitmaterjalid on tundlikud erinevate bioloogiliste kahjurite suhtes, nagu putukad (termiidid, mardikad), bakterid ning mädanik- ja hallitusseened. Bioloogilistest kahjuritest suurimat kahju tekitavad erinevad puitu lagundavad ning puidu pinnal kasvavad seened. Erinevalt mädanikest esineb hallitus puidu pinnal ning ei avalda mõju puidu mehaanilistele ja tugevusomadustele, kuid halvendab puidu välisilmet ning on indikaatoriks puidu lagunemist soodustavate tingimuste olemasolule, mistõttu on hallituse tekke vältimine üheks peamiseks tarindi niiskustehnilise toimivuse hindamiskriteeriumiks. (Schmulsky & Jones, 2011)

Erinevates allikates on toodud soovituslikud piirid, mida ületades on oht puidu pinnal hallituse tekkeks. (Schmulsky & Jones, 2011), (Wang & Ge, 2016) on andnud hallituse tekke vältimise kriteeriumiks, et puidu niiskussisaldus peab olema ≤ 20%. (Viitanen & Ojanen, 2007) andmetel on puitmaterjali pinnal hallitusseente kasvuks vajalikuks minimaalseks suhteliseks niiskuseks RH=75-80%, mis on sõltuvuses temperatuurist ning hallitusseente kasvuks soodsate tingimuste kestusajast.

Hallitusseente tekke ja kasvu hindamiseks puitmaterjalide ning teiste ehitusmaterjalide pinnal on laboratoorsete katsete tulemusel loodud matemaatiline hallituse kasvu arvutusmudel, mis võtab arvesse nii niiskuse, temperatuuri, hallituse tekkeks soodsate tingimuste kestusaja kui ka materjali pinna tundlikkuse. (Viitanen & Ojanen, 2007)

Vältimaks hallituse teket tarindis tuleks ehitusmaterjale ja välispiirdetarindeid ehitusprotsessi ajal kaitsta vihma eest, kattes need kilega või ladustada selliselt, et materjalide märgumise oht on minimaliseeritud. Samuti tuleks ehituse ajal rakendada

vastavaid kontrolltoiminguid (nt materjali niiskuse mõõtmine) vältimaks niiskunud materjali paigaldamist seinakonstruktsiooni või tagada materjali välja kuivamine enne järgnevate materjalikihtidega katmist. Ülalmainitud meetmete mittekasutamine loob kondensaadi tekke ohu ning hallituse tekkeks soodsad tingimused. (Kalamees et al., 2014)

3.5 Varasemalt läbi viidud uurimused

(McClung et al., 2014) võrdlesid oma uurimuses erineva päritoluga CLT-paneelidest seinakonstruktsioonide niiskustehnilist soojusja toimivust erineva puidu niiskussisalduse ning erineva difusioonitakistusega aurutõkkematerjalide kasutamise korral. Katsetatavate tarindite ehitus on toodud joonisel 3.3. Katse viidi läbi ühe aasta vältel Kanada kliimatingimustes ning arvutusmudeli koostamiseks ning kalibreerimiseks kasutati programmi Delphin. Ühe aasta pikkuse katseperioodi tulemused näitasid, et eelnevalt niisutatud CLT-paneelide (algniiskus 30%) niiskustase langes Kanada kliimatingimustes katseperioodi jooksul ohutule tasemele. Antud katses hinnati tarindid niiskustehniliselt toimivaks, kui CLT-paneeli niiskus jäi alla 20%. Selgus, et suure difusioonitakistusega aurutõkke kasutamine on riskantsem lahendus kui madala difusioonitakistusega aurutõkkematerjali kasutades.



Joonis 3.3. Katseseinte lõige (McClung et al., 2014)

Eesti kliimatingimustes on pikaajaliste mõõtmiste käigus uuritud seespoolse soojustusega palkseinte soojus- ja niiskustehnilist toimivust ning selle lahenduse usaldusväärsust. Katse raames testiti kolme erinevat soojustusmaterjali (tselluvill, pillirooplaat, mineraalvill) ning kuut erinevat lahendust, nagu on näidatud joonisel 3.4, Lenderi tüüpi eestiaegses kahekorruselises rõhtpalkseintega korterelamus. Katse tulemusena selgus, et ükski lahendus ei olnud soojus- ja niiskustehniliselt toimiv, kuna katseperioodi lõpus oli seina sees visuaalselt tuvastatav hallituse olemasolu ning palkseina niiskustase oli kõrge, ulatudes ~30%-ni. (Arumägi et al., 2011)



Joonis 3.4. Katseseinte lõiked (Arumägi et al., 2011)

(Arumägi et al., 2011) poolt kogutud mõõtmistulemuste põhjal on (Arumägi et al., 2015) analüüsinud projekteerimispraktikas renoveerimislahendusena kasutatava aurutõkkega 50 mm paksuse mineraalvillast seespoolse soojustuse niiskustehnilise toimivuse tõenäosust Põhjamaistes kliimatingimustes. Analüüsi tulemusena selgus, et laialt levinud renoveerimislahenduse niiskustehnilise toimivuse tõenäosus on 74% ning tõenäosus, et selline lahendus ei ole niiskustehnilistelt toimiv oli 26%.

CLT-paneelide niiskustehnilist toimivust Eestis on uuritud Põlvas asuva esimese netonullenergia hoone põhjal, kus hoone valmimisest alates (detsember 2012) salvestati ühe aastase perioodi jooksul seina eri kihtides temperatuuri ning suhtelise niiskuse mõõtmisandmed. Mõõtmistulemused näitasid, et väljastpoolt paksu soojustusekihi ning puitlaastplaadiga kaetud CLT-paneelseinast (vt Joonis 3.5) niiskuse väljakuivamine toimus aeglaselt – soojustuse kihis püsis suhtelise niiskuse (RH) tase üle 80% kuni suve alguseni (1.06.2013). Kuna seinad soojustati septembris 2012, siis püsis kõrge niiskustase tarindis ligikaudu kümne kuu vältel. Ehitusniiskuse väljakuivamine tarindist (CLT-paneelist ja tselluvillast) lõi soodsad kasvutingimused hallitusele. Matemaatilise hallituse kasvu arvutusmudeli kohaselt oli tarindis hallitusindeksi väärtuseks 3, mis tähendab, et materjali pinnal võis märgata silmale nähtavaid hallitusekoldeid. Kõrge niiskustase tarindis oli tingitud puitlaastplaadi kõrgest difusioonitakistusest ning paneelide ebakorrektsest ehitusaegsest ladustamisest, kus paneelid olid kaitsmata vihma eest. (Kalamees et al., 2014)



Joonis 3.5. Põlva netonullenergiahoone välisseina ja katuse tarindilahendused (Kalamees et al., 2014)

3.6 Uurimistöö eesmärk

Käesolevas inseneriõppe lõputöös on uuritud CLT-paneelidest seinakonstruktsioone, kus lisaks välispidisele soojustusele on paigaldatud lisasoojustus ka tarindi sisemisele poolele. Eesmärgiks on anda hinnang katseseinte niiskustehnilisele toimivusele Põhjamaade kliimatingimustes katse- ja arvutustulemuste põhjal ning lisaks arvutuslikult määrata kindlaks CLT-paneeli maksimaalne algniiskuse tase, mille puhul hallituse teke puidu pinnal on välistatud.

Uurimuse ajendiks oli huvi CLT niiskustehnilise toimivuse osas Põhjamaade kliimatingimustes mõlemalt poolt soojustusmaterjaliga isoleerimise korral ning lisaks ka soov uurida erinevate omadustega seespoolse soojustuse mõju tarindi niiskustehnilisele toimivusele.

Uurimisteema olulisus seisneb varasemate uurimuste vähesuses antud teemal. McClung et al., 2014 on varasemalt Kanada kliimatingimustes uurinud erinevatest puiduliikidest CLT-paneelseinte toimivust erineva niiskussisalduse korral ilma seespoolse soojustuseta ning oluliselt õhema välispidise soojustuskihi korral (soojustuse paksuseks oli 76 mm). (Kalamees, 2011) ja (Arumägi et al., 2015) on uurinud Eesti kliimatingimustes seespoolse soojustuse toimivust ilma välise soojustuseta ja selle lahenduse usaldusväärsust palkseintes. (Kalamees et al., 2014) on analüüsinud Põlvasse ehitatud Eesti esimese netonullenergiahoone CLT-paneelidest seinatarindi niiskustehnilist toimivust.

Uurimustöös uuritud probleemid (ehitusniiskus ning seespoolse lisasoojustuse toimivus) on praegu ning ka tulevikus aktuaalsed, seda eriti CLT-paneelidest seinatarindite puhul, kuna varasemalt on sarnaseid uurimusi vähe teostatud. Uurimustöö on jaotatud kolmeks peamiseks osaks: metoodika, tulemused ning tulemuste hindamine koos järeldustega. Eelmainitud osad omakorda on jaotatud väiksemateks alapeatükkideks.

4. MEETODID

4.1 Katsemetoodika

Uurimistöö eesmärgi saavutamiseks teostati laboratoorne katse Tallinna Tehnikaülikooli teadus- ja katselaboratooriumis asuvas kliimakambris. Katseseinte Mäepealse 3 ehitusele tarindilahenduse välja valimiseks teostati katseseinte eelnevalt mudelarvutused erinevate võimalike tarindilahenduse variantidega. Arvutusmudelite analüüsi tulemusel valiti välja tarindilahendused, mille niiskustehniline toimivus Põhjamaistes kliimatingimustes ei olnud kindel. Seespoolse lisasoojustusega ning erineva puidu niiskussisaldusega CLT-paneelseinte soojus- ja niiskustehnilise toimivuse hindamiseks ehitati kokku neli katseseina kahes erinevas konstruktsioonis. Seinad erinesid üksteisest CLT-paneelide algniiskuse ning seespoolse soojustuse poolest. Katseseinte paigutus kliimakambris nii sisekliima- kui ka väliskliima poolt on näidatud joonistel 4.1 ning 4.2, kus antud uurimuses kajastatavad katseseinad on tähistatud. Jooniselt on näha, et kliimakambrisse püstitati kokku kaheksa seina, kuid märgistamata seinu antud uurimuses ei ole kajastatud.



Joonis 4.1. Katseseinad kliimakambris seestpoolt vaadatuna



Joonis 4.2. Katseseinad kliimakambris väljaspoolt vaadatuna

Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõteandureid kasutati katseandmete registreerimiseks katseseinte erinevates kihtides. Andurite paigutus seinte eri kihtides on toodud joonisel 4.3 ning lisas 1 on näidatud igas tarindikihis kasutatud andurite tüübid.



Joonis 4.3. Andurite paigutus Isover Vario InLineriga soojustatud katseseintes (vasakul) ning Kingspan Therma TP10-ga soojustatud katseseintes (paremal)

4.1.1 Katseseinad

Uurimistöö raames valmis ehitatud seinte tüübid koos katseseinte tähistustega, paneelide ligikaudsete algniiskustega ning kasutatud materjalide deklareeritud soojuserijuhtivusega on toodud joonistel 4.4-4.7 (vt allpool). Seespoolse lisasoojustusena on kasutatud kaht erinevat soojustusmaterjali – muutuva difusioonitakistusega pinnakihiga mineraalvillast soojustust (Isover Vario InLiner)

paksusega 25 mm ning veeaurutihedat mõlemalt poolelt alumiiniumlaminaadiga kaetud PIR-soojustusplaati (Kingspan Therma TP10) paksusega 30 mm. Katseseinad on nimetatud paneeli ligikaudse niiskussisalduse ning seespoolse soojustuse tüübi järgi, kus nimetuses olev number näitab ligikaudset paneeli algniiskust ning numbri järel olevad tähekombinatsioonid tähistavad tarindis kasutatud seespoolse lisasoojustuse tüüpi. Tähis MW märgib ära Isover Vario InLiner seespoolse soojustuse ning tähis PIR märgib soojustust Kingspan Therma TP 10.



Joonis 4.4. Katseseina CLT13MW ehitus



Joonis 4.5. Katseseina CLT13PIR ehitus

CLT13MW

Kipsplaat Knauf White	13 mm
(λ ≤0,24W/(mK))	
Isover Vario InLiner	25 mm
(λ ≤0,031W/(mK))	
Liimitud ristkihtpuitpaneel P2	100 mm
(5-kihiline, algniiskus ≈12-14%	6)
Min.vill Knauf Classic 037	200 mm
(λ ≤0,037W/(mK))	
Tuuletőkkeplaat Isover RKL 31	30mm
(λ ≤0,031W/(mK))	

CLT13PIR

Kipsplaat Knauf White (λ ≤0.24W/(mK))	13 mm
Kingspan Therma TP10	30 mm
(λ ≤0,023W/(mK))	400
(5-kihiline, algniiskus ≈12-14%	100 mm
Min.vill Knauf Classic 037 (λ ≤0,037W/(mK))	200 mm
Tuuletőkkeplaat Isover RKL 31 () ≤0.031W/(mK))	30mm



Joonis 4.6. Katseseina CLT20MW ehitus





13 mm

25mm

100mm

200 mm

30mm

CLT20MW Kipsplaat Knauf White

(λ ≤0,24W/(mK))

(λ ≤0,031W/(mK)) Liimitud ristkihtpuitpaneel P3

Min.vill Knauf Classic 037

(λ ≤0.037W/(mK))

(5-kihiline, algniiskus ≈20%)

Tuuletőkkeplaat Isover RKL 31

Isover Vario InLiner

$(\Lambda = 0, 24 W/(11 K))$	
Kingspan Therma TP10	30mm
(λ≤0,023W/(mK))	
Liimitud ristkihtpuitpaneel P4	100mm
(5-kihiline, algniiskus ≈20%)	
Min.vill Knauf Classic 037	200 mm
(λ ≤0,037W/(mK))	
Tuuletőkkeplaat Isover RKL 31	30mm
(λ≤0,031W/(mK))	

Joonis 4.7. Katseseina CLT20PIR ehitus

Kõik katsetatavad seinad on CLT-paneeli välimiselt poolelt kahes kihis soojustatud 100 mm paksuse mineraalvillaga Knauf Classic 037 (vertikaalvuugid on asetatud nihkes) ning kaetud 30 mm paksuse mineraalvillast tuuletõkkeplaadiga Isover RKL 31. Plaanitud oli teipida tuuletõkketeibiga ka tuuletõkkevilla vuugid, kuid tiheda ajalise graafiku tõttu jäi sügisperioodi alguseks tuuletõkketeip paigaldamata ning hiljem otsustati teibi paigaldamisest loobuda, vältimaks katsetingimuste varieerumist katseperioodi vältel. Vältimaks niiskuse väljumist konstruktsiooni külgedest on katseseintes olevate CLT-paneelide servad eelnevalt kaetud niiskustõkkemastiksiga ning seinakonstruktsioon on paigaldatud 18 mm paksuse veekindlast vineerist raami sisse. CLT-paneelide ja vineerist raami vaheline montaaživahe on täidetud ehitusvahuga Makroflex Pro. CLT-paneeli ja seespoolse soojustuse ääreservad on isoleeritud aurutõkketeibiga Tesa 25x60 mm. Ehitatud katseseinad CLT13MW ja CLT13PIR koos paigaldatud anduritega on toodud joonistel 4.8 ja 4.9 (vt allpool). Seinad CLT20MW ja CLT20PIR on oma ehituselt samasugused, mistõttu ei ole jooniseid nende seinte kohta eraldi välja toodud (erinevad ainult paneeli algniiskuse poolest).



Joonis 4.8. Katsesein CLT13MW vahetult enne kliimakambrisse paigaldamist



Joonis 4.9. Katsesein CLT13PIR vahetult enne kliimakambrisse paigaldamist

Katseseintes on kasutatud Peetri Puit OÜ tehases valmistatud 5-kihilisi CLT-paneele mõõtmetega 850x850 mm ning paksusega 100 mm. Paneelide kihid on valmistatud 20x140 mm mõõtmetega kuusepuidust laudadest. Paneelide ettevalmistusprotsess ning katse on teostatud Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 asuvas ehituskonstruktsioonide teadus- ja katselaboratooriumis. Suurema niiskussisalduse saavutamiseks paigutati CLT-paneelid tähistusega P3 ning P4 (vt Tabel 4.1) välitingimustesse rajatud basseini, kus paneele kindlate ajavahemike järel veega kasteti ligikaudu kahenädalase perioodi vältel. Basseini põhi ning küljed isoleeriti tugeva ehituskile abil, vältimaks seinapaneelide kuivamist ning kastmisvee imbumist pinnasesse (vt Joonis 4.10). Kastmisperioodide

vahel kaeti paneelid pealtpoolt koormakattega, kindlustamaks, et paneelid oleksid võimalikult niiskes keskkonnas.

Enne paneelide niisutamise algust kaaluti kõik paneelid tehnilise kaalu abil ning mõõdeti paneelide niiskussisaldust nõeltega niiskusmõõtja Gann Hydrotest LG3 abil 45 mm sügavusel paneeli pinnast. Niisutusperioodi lõpus kaaluti märjad paneelid uuesti ning mõõdeti paneelide niiskussisaldused. Mõõtmistulemused registreeriti tabelisse 4.1. CLT-paneelid, mille niiskussisaldust suurendada ei olnud tarvis, kaeti õhukese kilega vältimaks paneelide liigset kuivamist ning hoiustati katse alguseni sisetingimustes Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 asuvas ehituskonstruktsioonide katse- ja teaduslaboratooriumis.

Piisava niiskussisalduse saavutamise järel lõigati CLT-paneelid katseseinte ehituseks sobivasse mõõtu 765x850(h) mm ning kaeti uuesti õhukese kilega tagamaks paneelide vajaliku niiskussisalduse säilimine. Katseseina CLT13MW paigaldatud eelnevalt niisutamata CLT-paneeli tähistusega P2 algniiskus oli 11.86% ning katseseina CLT13PIR eelnevalt niisutamata CLT-paneeli tähistusega P1 algniiskuseks oli 12.37%.



Joonis 4.10. CLT-paneelide niisutamine välibasseinis

Tabel 4.1. Katseseintesse paigaldatud niisutatud paneelide niiskussisaldused

Tähis	Esialgne niiskussisaldus (%)	Esialgne mass (g)	Lõplik niiskussisaldus (%)	Lõplik mass (g)
P3	12.46	30 963	18.7	33 060
P4	12.86	30 410	20.6	32 960

Katseseinte keskosa soojusläbivused on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 4.3). Kuna katsetatavate seinte puhul on seinte keskosas tegemist soojuslikult homogeensetest kihtidest koosneva tarindiga, siis on katseseinte soojusläbivuste leidmiseks kasutatud standardis EVS 908-1: 2016 toodud valemeid.

$$U = \frac{1}{R_T}, \ W/(m^2 K)$$
(4.1)

Kus:

R_T – piirde kogusoojustakistus, (m²K)/W

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (m^2 K)/W$$
(4.2)

Kus:

R_{si} – piirde sisepinna soojustakistus (m²K)/W (vt. Tabel 4.2);

R₁, R₂ – iga materjalikihi soojustakistus (m²K)/W;

R_{se} – piirde välispinna soojustakistus (m²K)/W.

$$R = \frac{d}{\lambda} , (m^2 K) / W \tag{4.3}$$

Kus:

d - materjalikihi paksus, m;

 λ – materjali arvutuslik soojuserijuhtivus W/(m·K).

Tabel 4.2. Piirde pindade soojustakistused piirdetarindi soojusläbivuse arvutamisel (EVS 908-1: 2016)

Soojusvoo suund				
	Üles (lagi)	Horisontaalne (sein)	Alla (põrand)	
R _{si} (m²K)/W	0.10	0.13	0.17	
R _{se} (m²K)/W	0.04	0.04	0.04	

Tabel 4.3. Katseseinte soojusläbivused

Katsesein	Seina keskosa soojusjuhtivus, U (W/(m²·K))
CLT13MW	0.117
CLT13PIR	0.124
CLT20MW	0.124
CLT20PIR	0.117

Katselised veeauru osarõhud tarindite erinevates kihtides arvutati andurite salvestatud temperatuuri ning suhtelise niiskuse andmete põhjal. Veeauru osarõhkude arvutamiseks leiti esialgu veeauru küllastusrõhk antud temperatuuri juures, kasutades valemeid 4.4 ja 4.5. Veeauru osarõhk avaldatakse suhtelise niiskuse arvutusvalemist (valem 4.6). (EVS-EN ISO 13788:2012)

$$p_{sat} = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot T}{237.3 + T}}$$
, kui $T \ge 0^{\circ}$ C, Pa (4.4)

$$p_{sat} = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875 \cdot T}{265.5 + T}}$$
, kui T ≤ 0 °C, Pa (4.5)

Kus:

T- temperatuur, °C.

$$RH = \frac{p}{p_{sat}} \cdot 100\%$$
(4.6)

Kus:

RH – suhteline niiskus, %;

p-veeauru osarõhk niiskes õhus, Pa;

 p_{sat} – veeauru osarõhk veeaurudega küllastunud õhus samal temperatuuril, Pa.

4.1.2 Mõõtevahendid

Katseandmete salvestamiseks on iga materjalikihi vahele ja CLT-paneelide keskele puuritud avasse paigaldatud mõõteandurid. Temperatuuri ja suhtelise niiskuse mõõtmiseks on kasutatud kaht tüüpi andureid: A-1 Humisense (\emptyset = 5 mm; mõõtetäpsus T= ±0.3°C; RH= ±2.0%) ning Rotronic HC2-04 andureid (\emptyset = 5 mm; mõõtetäpsus T=±0.3°C; RH= ±1.5%). Pinnatemperatuuri mõõtmiseks on kasutatud temperatuuriandureid TMC50-HD koos analoogandmelogeritega HOBO UX12-006M (\emptyset = 5.1 mm; mõõtetäpsus T=±0.15°C temperatuurivahemikus 0° kuni 70°C). Soojusvoo mõõtmiseks tarindis on kasutatud Hukseflux HFP01 soojavooplaate mõõtetäpsusega ±3%. Mõõtmisintervalliks Rotronic HC2-04, A-1 Humisense ning TMC50-HD anduritel on üks tund ning soojusvooplaatidel Hukseflux HFP01 10 minutit. Andurite põhimõtteline paiknemine on näidatud joonisel (vt Joonis 4.3) ning igas kihis paikneva anduri tüüp on toodud lisas 1.

4.1.3 Katsekeskkond

Katseseinad paigaldati Tallinna Tehnikaülikooli Mäepealse 3 katselaboris paiknevasse kliimakambrisse. Kliimakamber koosneb sise- ja väliskliimakambrist, milles on võimalik luua uuringu jaoks vajalikud kliimatingimused (vt Joonis 4.11). Sise- ja väliskliimakambri vahel paikneb 50 cm laiune raam, millesse on võimalik ehitada uuritav tarind. Kliimakamber on ehitatud omavahel hermeetiliselt ühendatud 200 mm paksustest kõrgsurve polüuretaansoojustusega paneelidest, mille sisepind on kaetud mati musta polüester-fiiberplastiga. Kliimakambri põrand on ehitatud veekindlast vineerist, mis on kaetud EPO-kattega. Kliimakamber on juhitav automaatse juhtimissüsteemi abil, mis saab tarviliku informatsiooni erinevatelt juhtimis- ja mõõteseadmetelt. (Kliimakamber..., 2011)



Joonis 4.11. Kliimakambri ehitus (Kliimakamber..., 2011)

Väliskliimakambri sisemõõdud on: laius 3,65 m, kõrgus 3,30 m, pikkus 3,95 m. Põrand on varustatud elektripõrandaküttega, vältimaks põranda jäätumist. Väliskliimakambri temperatuuri on võimalik muuta ja hoida ühtlaselt vahemikus –25 °C...+50 °C.

Reguleerimise täpsus on 0,1 °C ja temperatuuri püsivus on ± 0,2 °C. Suhtelist niiskust on võimalik hoida vahemikus: 20 %...80 % ($T_e \ge +10$ °C $\rightarrow 20$ %...99 %); reguleerimise täpsus on 1 % ja suhtelise niiskuse püsivus ± 2 %...± 3 %. (*Ibid.*)

Sisekliimakambri sisemõõdud on: laius 3,65 m, kõrgus 3,30 m, pikkus 2,05 m. Sisekliimakambri temperatuuri on võimalik muuta ja hoida ühtlaselt vahemikus 0 °C...+50 °C. Reguleerimise täpsus 0,1 °C ja temperatuurpüsivus on \pm 0,2 °C. Suhtelist niiskust on võimalik hoida vahemikus: 10 %...80 %, reguleerimise täpsus 1 % ja suhtelise niiskuse püsivus \pm 2 %. (*Ibid*.)

Kliimakambri katse kogukestuseks oli 86 päeva ning katse viidi läbi ajavahemikus 20.01.2018- 16.04.2018 ning selle aja jooksul imiteeriti terve aasta väliskliimatingimusi. Sügiseste kliimatingimuste kestuseks oli ligemale 40 päeva, talviste kliimatingimuste kestus koos sügiskliimalt talvistele kliimatingimustele üleminekuajaga (üleminekuaja pikkus ~5 päeva) 26 päeva ning kevadiste kliimatingimuste, kus on arvesse võetud ka päikesekiirguse positiivset mõju tarindi pinnatemperatuurile ja suhtelisele niiskusele, kestuseks 20 päeva, sh üleminekuperiood ~3 päeva. Kliimakambri katses kasutatud ääretingimused (sisetemperatuur, välistemperatuur, siseõhu suhteline niiskus, välisõhu suhteline niiskus) on toodud joonistel 4.12 ja 4.13 (vt allpool). Alloleval kliimakambri ääretingimuste graafikul on näha, et andurite poolt salvestatud andmetes on näidud kohati hüppeliselt langenud ja tõusnud, mis on tingitud katse ajal kliimakambriga seotud tehniliste rikete tõttu.





Joonis 4.12. Kliimakambri katse sise- ja väliskliima temperatuurigraafik

Joonis 4.13. Kliimakambri katse sise- ja väliskliima suhtelise õhuniiskuse graafik

4.2 Arvutusmetoodika

4.2.1 Arvutustarkvara

Katseseinte arvutusmudelite koostamiseks ja arvutamiseks on kasutatud Delphin 5.9.3 arvutustarkvara, mille on välja töötanud Dresdeni Tehnikaülikooli ehitusklimatoloogia instituudi teadlased Andreas Nicolai, John Grunewald, Heiko Fechner ning Ulrich Ruisinger. Allpool on toodud ka arvutustarkvara kasutajaliidest iseloomustav joonis (vt Joonis 4.14). Tegemist on matemaatilistel arvutusmeetoditel põhineva dünaamilise simulatsiooniprogrammiga, mille abil on võimalik määrata soojuse, niiskuse ning osakeste liikumist poorsetes ehitusmaterjalides. Delphin arvutustarkvara kasutatakse erinevate ehitusfüüsika ülesannete lahendamiseks (Grunewald, Nicolai, 2015):

- Külmasildade arvutused, sh ka niiskustehniliselt probleemsete alade hindamiseks (kondensaadiarvutused);
- Seespoolsete soojustussüsteemide toimivuse hindamine;
- Ventileeritud fassaadisüsteemide ning -katuste toimivuse hindamine;
- Niiskuse väljakuivamisega seotud probleemide lahendamine (keldrid, ehitusniiskus, üleujutused jne);
- Tarindites hallituse tekke riski hindamine;
- Arvutused aastase küttevajaduse hindamiseks arvestades soojusjuhtivuse sõltuvust niiskustasemest.

	Contraction/C	Horretisation		Asspiments/Seasthon	Materials.	
				Fee: At assignments Invest state (RLS) Deression invest Users and and the state Users and the state User	Constant in the second se	Field a fill Provide the Harmonia Scheme Harmonia Scheme Harmonia
				0 	tpun	82
limencompany 121	810. In over Selection	100E,Y	Demonsti (146-244	tie Färuns	Dutest Farriet Dutest Get	1 I+
-	Warrings and entiriting console I	click light to delete message	51	In research reading 03.04	New output fermal Hours	_

Joonis 4.14. Kuvatõmmis arvutustarkvara Delphin 5.9.3 kasutajaliidesest

Tarkvara võimaldab arvutada tarindeid nii ühe- kui kahemõõtmelisena, kus simulatsiooni läbiviimiseks tuleb defineerida järgmised algandmed:

- Konstruktsiooni geomeetria;
- Materjalid ning nende omadused;
- Algtingimused tarindi sise- ja välispindadel, materjalikihtides;
- Ääretingimused;
- Soovitavad väljundid
- Modelleerimise variant/parameetrid;
- Modelleerimise arvutustäpsus.

Arvutustarkvara Delphin 5.9 töötab füüsikalise mudeli CHAMPS alusel. CHAMPS on lühend mõistetest "coupled heat, air, moisture, pollutant simulation" ning "heat, air, moisture, pollutants and salt transport", mis tõlgituna tähendab kombineeritud soojuse, õhu, niiskuse ning saasteainete simulatsiooni. Eelnimetatud füüsikaline mudel sisaldab endas mitmeid osatuletistega võrrandeid, mis lahendatakse lõplike elementide meetodit kasutades. Tarkvara jaotab kasutajal poolt sisestatud tarindi geomeetria ühemõõtmelistes arvutustes kas ühesuguse või muutuva paksusega osadeks. Kasutajal on võimalik defineerida elementide koguarv, mille alusel jaotab tarkvara konstruktsiooni osadeks. Integreerimisel üle ruumala on võrrandid jagatud harilikeks diferentsiaalvõrranditeks, milles kõik tundmatud on ajast sõltuvad. Diferentsiaalvõrrandid lahendatakse arvmeetodeid kasutava lahendaja (inglisk. Solver) abil. (Grunewald, Nicolai, 2015)

Arvutustarkvara Delphin on mitmel korral valideeritud nii programmi loojate kui ka teiste teadlaste ja institutsioonide poolt erinevates teadusprojektide raames. Viimane tarkvara testimine autorite poolt teostati 2013.aastal, mil tarkvaraga sooritati edukalt järgmised testimised. HAM-mudelite standardis HAMSTAD esitatud arvutuskriteeriumid 1 kuni 5, mis kirjeldavad soojus-, niiskus- ning õhuvoogude liikumist ehitusmaterjalides, tarindi või ehitisosade soojus- ja niiskustehnilist toimivust kirjeldavale standardile EN 15026:2007 vastavuse kontrolli. Samuti oli edukas ka hoonete külmasildade arvutust kirjeldava standardile EN 10211:2007 kohase vastavuse kontroll. (Sontag, Nicolai, & Vogelsang, 2013)

Arvutustarkvara Delphin 5.9 kasutab ülesannete lahendamiseks alljärgnevaid tasakaaluvõrrandeid:

Niiskustasakaal:

Tasakaaluvõrrand põhineb järgmistel eeldustel ning lihtsustustel (Grunewald, Nicolai, 2015):

- Jääd ei teki;
- Kehtib Kelvini võrrand poorirõhu ja suhtelise niiskuse kohta;
- Vee difusioon ja faasidevaheline rõhuerinevus on tühiselt väikesed ning neid arvesse ei võeta;
- Tahkete materjalide deformatsioonid on tühiselt väikesed, mistõttu neid arvesse ei võeta;
- Kõikide faaside vahel esineb rõhkude tasakaal.

Arvestades eeltoodud lihtsustusi, avaldub niiskustasakaalu võrrand järgmisel kujul (valem 4):

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{m_{w+\nu}} = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{con\nu}^{m_w} + j_{con\nu}^{m_v} + j_{diff}^{m_v} \right] + \sigma_{REV}^{m_{w+\nu}}$$
(4.7)

Kus:

 $\rho_{REV}^{m_{W+\nu}}$ on koguniiskuse (vedeliku ja veeauru) tihedus antud ruumalaühikus [kg/m³];

 $j_{conv}^{m_w}$ on vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)];
$j_{conv}^{m_v}$ on veeauru konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog [kg/(m²·s)];

$$j_{diff}^{m_v}$$
 on veeauru diffuusse liikumise voog [kg/(m²·s)];

 $\sigma_{REV}^{m_{W+v}}$ on niiskuslisa/ -kadu antud ruumalaühiku kohta [kg/(m³·s)].

Vee konvektiivse (kapillaarse) liikumise voog

$$j_{conv}^{m_w} = c_l^{m_w} \cdot j_{conv}^{m_l} \tag{4.8}$$

Kus:

 $c_l^{m_w} = 1 - c_l^{m_{voc}}$ on vee kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg]; $c_l^{m_{voc}}$ on lenduvate orgaaniliste ühendite (*volatile organic compound* – VOC)

kontsentratsiooni vedelikus iseloomustav tegur [kg/kg];

$$j_{conv}^{m_l} = -K_l \left[\frac{\partial p_l}{\partial x} + \rho_l g \right]$$
on konvektiivne voog vedelikus [kg/m²·s)]; (4.9)

Kus:

K_l – veejuhtivus [s];

p_l – veerõhk [Pa];

 ρ_l – vee tihedus [kg/m³];

g – raskuskiirendus [m/s²].

$$K_l(\theta_l, T, c_l^{m_{voc}}) = \frac{[\eta_{voc}(T) - \eta_w(T)]c_l^{m_{voc}} + \eta_w(T)}{\eta_w(T_{ref})} \cdot K_l(\theta_l, T_{ref}, c_l^{m_{voc}} = 0)$$
(4.10)

Kus:

 $\eta_w(T)$ – puhta vee viskoossus;

 $\eta_{voc}(T) - \text{VOC viskoossus;}$

 $K_l(\theta_l, T_{ref}, c_l^{m_{voc}} = 0)$ – referentstingimustel mõõdetud vedela vee juhtivus

Veeauru konvektiivne voog

$$j_{conv}^{m_v} = c_g^{m_v} \cdot j_{conv}^{m_g}$$
(4.11)

Kus:

$$j_{conv}^{m_g} - \text{konvektiivne gaasivoog [kg/m²s];}$$

$$c_g^{m_v} = \frac{p_v}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_a}{R_v} - \text{veeauru massi kontsentratsioon gaasis [kg/kg];}$$
(4.12)

Kus:

$$p_{v}$$
 – veeauru osarõhk [Pa]; p_{a} – õhurõhk [Pa];

 R_a – universaalne gaasikonstant [J/(kg·K)];

 R_v – veeauru gaasikonstant [J/(kg·K)];

Difusiooni teel liikuv veeaur

$$j_{diff}^{m_v} = -\frac{D_{v,air}(T)}{\mu R_v T} f(\theta_g) \frac{\partial p_v}{\partial x}$$
(4.13)

Kus:

 $D_{v,air}(T)$ – seisva õhu veeaurujuhtivus [m²/s];

 μ – difusioonitakistustegur [-];

 $f(\theta_g)$ – funktsioon gaasi mahust ruumalaühiku kohta [-];

$$\theta_g = \theta_{por} - \theta_l \tag{4.14}$$

Kus:

 θ_g – gaasi maht ruumalaühikus [m³/m³];

 θ_{por} – materjali poorsus [m³/m³];

 θ_l – vee maht ruumalaühikus [m³/m³].

Õhu massi tasakaal:

Tasakaaluvõrrand põhineb järgmistel eeldustel ning lihtsustustel (Grunewald, Nicolai, 2015):

- Kuiv õhk sisaldab O₂, N₂ ning teisi vähemtähtsaid osakesi, välja arvatud VOC (volatile organic compounds e. lenduvad orgaanilised osakesed) ning veeauru;
- Gaaside segu sisaldab kuiva õhku, veeauru ning VOC;
- Gaaside segu konvektiivset voogu vaadeldakse eraldi soojuse, niiskuse ning saasteosakeste liikumisest, ehk soojuse, niiskuse ja saasteosakeste liikumisel ei ole õhuvoole muud mõju kui ainult üleslükkejõud;
- Arvesse võetakse ainult laminaarset gaasivoolu;
- Liikumise kineetiline energia on tühiselt väike, mistõttu seda ei võeta arvesse;

Kuiva õhu gaasikonstant on kasutatav ka niiske õhu puhul.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{m_a} = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{conv}^{m_a} \right] + \sigma_{REV}^{m_a} \tag{4.15}$$

Kus:

 $\rho_{REV}^{m_a}$ – õhu massi tihedus referentsruumala kohta [kg/m³]; $j_{conv}^{m_a}$ – konvektiivne õhu massi voog [kg/m²s]; $\sigma_{REV}^{m_a}$ – õhu allikad/lekked referentsruumala kohta [kg/m³s];

Õhumassi konvektiivse liikumise voog

$$j_{conv}^{m_a} = c_g^{m_a} j_{conv}^{m_g}$$

$$\tag{4.16}$$

Kus:

$$c_g^{m_a} = \frac{p_a}{p_a + p_v} \cdot \frac{R_v}{R_a}$$
 on õhu massi kontsentratsioon gaasis [kg/kg]; (4.17)

$$j_{conv}^{m_g} = -K_g \left[\frac{\partial p_g}{\partial x} + \rho_g g \right]$$
on gaasi konvektiivne voog [kg/m²s]; (4.18)

K_g – materjali gaasiläbivus [s]

$$p_g = p_a + p_v$$
 on gaasirõhk [Pa] (4.19)

$$\rho_g = \frac{\rho_g}{R_a T}$$
 on gaasi tegelik tihedus [kg/kg] (4.20)

Sisemine energia tasakaal

Tasakaaluvõrrand põhineb järgmistel eeldustel ning lihtsustustel (Grunewald, Nicolai, 2015):

- Sisemise energia ja entalpia vahelin erinevus on tühiselt väike, mistõttu sellega arvutustes ei arvestata;
- Temperatuuride tasakaal esineb kõikide faaside vahel.

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho_{REV}^{U} = \frac{\partial}{\partial x} \left[j_{diff}^{Q} + u_l j_{conv}^{m_l} + u_g j_{conv}^{m_g} + h_v j_{diff}^{m_v} + h_{voc,g} j_{diff}^{m_{voc,g}} \right] + \sigma_{REV}^{U}$$
(4.21)

Kus:

 ρ^U_{REV} – siseenergia tihedus [J/m³];

 j_{diff}^{Q} – soojusenergia voog [W/m²];

 u_l – vee eri siseenergia [J/kg];

 $j_{conv}^{m_l}$ – vee konvektiivse liikumise voog [W/m²];

u_g – gaasi eri siseenergia [J/kg];

 $j_{conv}^{m_g}$ – gaasi konvektiivse liikumise voog [W/m²];

 h_v – veeauru entalpia [J/kg];

 $j_{diff}^{m_v}$ – veeauru difuusse liikumise voog [W/m²];

 $h_{voc,g}$ – lenduvate orgaaniliste osakeste entalpia [J/kg];

 $j_{diff}^{m_{voc,g}}$ – lenduvate orgaaniliste ühendite (VOC) difuusse liikumise voog [W/m²];

 σ_{REV}^{U} – energia muutumise suurus antud ruumalaühikus [W/m³s].

$$j_{diff}^{Q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{4.22}$$

Kus:

 λ – materjali soojuserijuhtivus [W/(m·K)];

T – temperatuur [K].

4.2.2 Modelleerimise metoodika

Modelleerimise eesmärgiks oli luua katsetulemustele võimalikult täpselt vastav arvutusmudel, millega teostada edasised arvutused CLT-paneeli maksimaalse algniiskuse leidmiseks antud tarindites. Mudeli ääretingimusteks määrati kliimakambri katse käigus andurite poolt registreeritud suhtelise niiskuse ning temperatuuri väärtused. Mudeli täpsustamiseks korrigeeriti tarindites olevate materjalide soojuserijuhtivust ning CLT-paneelide algniiskust senikaua, kuni saavutati katsetulemustele võimalikult sarnased tulemused. Arvutusmudelite korrektsust hinnati nelja erineva näitaja (temperatuur, soojusvoog, veeauru osarõhk, suhteline niiskus) põhjal koostatud võrdlusgraafikute abil katseliste tulemustega. Eesmärk on saavutada võimalikult täpselt katsetulemustele vastav mudel, kus andmebaasis sisalduvate materjalide omadusi korrigeeritakse minimaalselt.

Mudeli valideerimisel on kasutatud arvutustarkvara Delphin 5.9.3 andmebaasis olevaid materjale, mis on toodud allolevas tabelis koos mudeldamisel kõigis seintes kasutatud näitajatega (vt Tabel 4.4). Mudelite kalibreerimise käigus on korrigeeritud vaid materjalide soojuserijuhtivuse (λ) väärtuseid, mis tähendab, et need ei pruugi olla samad, mis andmebaasis toodud materjalidel.

Arvutusmudelis on teatud materjalkihtidele lisatud ka lisatakistused, milleks on CLTpaneeli puidukihtide vahel olevad liimikihid, Isover Vario InLineri seespoolse soojustuse sisekliimapoolsel küljel paiknev muutuva veeaurutakistusega aurutõkkekiht ning Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustuse mõlemal küljel olevad alumiiniumlaminaadikihid. CLT-paneelis olevad liimikihid on arvutusmudelis defineeritud materjalikihtidevahelise lisatakistusena, kus suhteline difusioonitakistustegur on $S_d=1.25$ m (Kukk, 2016) ning on defineeritud vaba vee voogu takistava barjäärina. Kingspan Therma TP10 külgedel paiknevad alumiiniumlaminaadikihid on defineeritud õhukeste õhuvoolu, veevoolu ning difusiooni takistavate "kiledena", mille Sd=1.65 m. Isover Vario InLiner soojustusmaterjali sisemisel küljel paiknev aurutõkkekiht on defineeritud õhukese õhuvoolu, veevoolu ning suhtelisest niiskusest sõltuva muutuva difusioonitakistusega "kilena", mille difusioonitakistustegur on madala suhtelise niiskuse korral kõrgem ning vastupidi (difusioonitakistustegur muutub vahemikus S_d= 0...15 m).

Materjali nimetus	Materjali- kihi paksus	Materjali tihedus	Soojuseri- juhtivus	Difusiooni- takistus- tegur	Veesorptsiooni väärtus RH=80% juures	Avatud poorsus
	d (mm)	ρ (kg/m3)	λ(W/m·K)	μ (-)	Θ₈₀(m³/m³)	Θ _{por} (m ³ /m ³)
Kipsplaat Knauf Standard	13	745.1	0.21	10.9	0.0088	0.7188
<i>Kingspan</i> Therma TP10	30	35	0.023	100	0.0020	0.949
lsover Vario InLiner	25	112	0.031	1	0.00016	0.92
CLT-paneel (5-kihiline)	100	437.6	0.11	474.7	0.0626	0.7082
Mineraalvill Knauf <i>Classic</i> 037	200	37	0.039	1	0.00016	0.92
Tuuletõkkevill RKL31	30	112	0.031	1	0.00016	0.92

Tabel 4.4. Arvutusmudelites kasutatud materjalid ja nende omadused

Katseseinte arvutusmudelites olevate CLT-paneelide algniiskused on toodud tabelis 4.5. Eelnevalt niisutatud paneelide, mis paigaldati seintesse CLT20MW ning CLT20PIR, niiskustase varieerus kihiti. Arvutusmudeli kalibreerimisel selgus, et vastavalt mõõtmistulemustele olid paneeli keskmised kihid oluliselt madalama niiskusega kui paneeli välimised kihid. Katseseinte CLT13MW ning CLT13PIR niiskus paneelides oli ühtlane kogu paneeli ulatuses, kuna neid paneele enne paigaldamist ei niisutatud. Nii tabelis 4.4 kui ka tabelis 4.5 olevate väärtuste puhul tuleb meeles pidada, et nendes toodud väärtusi on kasutatud ainult arvutusmudelites, kasutatud ehitusmaterjalide tootja poolt deklareeritud materjaliomadused (soojuserijuhtivus) on toodud joonistel 4.4-4.7 olevatel katseseina lõigetel.

Seina tähis	Paneeli algniiskus paneeli kihtides (%)							
	Kiht 1	Kiht 2	Kiht 3	Kiht 4	Kiht 5			
CLT13MW	1	0.7 (üht	lane niis	kustase)	_	1	2 3 4 5
CLT13PIR	1	0.7 (üht	lane niis	kustase)			
CLT20MW	19.0	16.8	11.3	16.8	19.0			
CLT20PIR	20.6	16.8	12.5	16.8	20.6			

Tabel 4.5. Arvutusmudelites kasutatud CLT-paneelide algniiskused ning kihtide järjestus

Kalibreeritud arvutusmudeli abil teostatakse edasised arvutused tarindis oleva CLTpaneeli maksimaalse algniiskuse kindlaks määramisel Põhjamaade kliimatingimustes. Arvutustes kasutati välise ääretingimusena Väike-Maarja 1989-90 aastate kliimaandmeid (hallituse testaasta). Arvutusperioodi pikkuseks oli 5 aastat ning arvutusperioodi kriitiline niiskus paneelis arvutatakse eeldusel, et paneel on ühtlase niiskussisaldusega kõikides kihtides. Arvestatud ei ole kaldvihmaga, kuna katseseinte arvutusmudelitele ei ole lisatud fassaadikatet (viimaseks kihiks tuuletõkkevill) ning sisekliima ääretingimustena on kasutatud standardi EVS-EN ISO 13788:2012 esitatud niiskusklassile 3 vastavaid niiskuslisa väärtuseid, mis on toodud alloleval joonisel. Niiskusklass 3 alla kuuluvad teadmata niiskuskoormusega elamud ning eluruumid asustustihedusega kuni 30 m² inimese kohta. Sisetemperatuuriväärtustena on kasutatud (Ilomets et al., 2017) poolt esitatud mõõtmistulemuste põhjal mudelarvutuste jaoks loodud andmeid, kus kasutatud on keskmistest temperatuuriväärtustest 1°C võrra madalamaid väärtusi. Sisekliima ääretingimused on näidatud joonisel 4.15.



Joonis 4.15. Arvutustes kasutatud sisekliima ääretingimused

Kalibreeritud arvutusmudelite abil arvutatakse CLT-paneeli maksimaalne algniiskus katseseintes, kasutades Viitaneni hallitusindeksit. Hallitusindeksi arvutamisel on oluline korrektselt määrata materjali ja tema pinna tundlikkus hallituse suhtes. Tundlikkuse klassid ning nendele vastavate materjalide näited on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 4.6). Joonisel 4.16 on näidatud tabelis 4.6. toodud pinnatundlikkuse klasside mõju hallitusindeksi suurusele ning muutumise kiirusele. (Viitanen, Ojanen, & Peuhkuri, 2011)

Tundlikkuse klass	Materjal
Väga tundlik	Männi maltspuit
Tundlik	Liimitud puitplaadid, PUR (paberkattega), kuusk
Keskmiselt vastupidav	Betoon, gaasbetoon, klaasvill, polüestervill
Vastupidav	PUR (fooliumiga kaetud)

Tabel 4.6. Hallitusindeksi materjali pinna tundlikkuse klassid (Viitanen et al., 2011)



Joonis 4.16. Hallituse intensiivsuse kasv ajas eri tundlikkusega pindadel (Viitanen et al., 2011)

4.2.3 Hindamiskriteeriumid

Antud uurimuse tarbeks valmis ehitatud katseseintesse paigutatud kuusepuidust CLTpaneelid liigituvad Viitaneni tundlikkuse klassi järgi hallitusele tundlikuks materjaliks (nii materjal kui ka pind).

Joonisel on toodud hallituse kasvuks soodsad temperatuuri ja suhtelise niiskuse tingimused (vt Joonis 4.17).

$$RH_{crit} = \begin{cases} -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0, \ kui \ T \le 20\\ 80\%, \ kui \ T > 20 \end{cases}$$
(4.23)

Kus:



Joonis 4.17. Hallituse kasvuks soodsad tingimused (Hukka & Viitanen, 1999).

Viitanen, Ojanen, & Peuhkuri, 2011 poolt täpsustatud hallituse kasvu hindamismudel põhineb hallitusindeksil, mille väärtused on toodud allolevas tabelis (vt Tabel 4.7) ning mille arvutusvalem on toodud allopool (vt valem 4.24).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02} k_1 k_2$$
(4.24)

Kus:

M-hallitusindeks, -;

t – aeg, nädalates;

W – puiduliik (0= mänd ning 1=kuusk);

SQ – materjali pinnakvaliteet (0 – kamberkuivatis kuivatatud puit ning 1 – õhu käes kuivanud puit);

 k_1 – korrektsioonikoefitsent, mis arvutatakse valemi (4.25) abil;

$$k_1 = \begin{cases} 1 \frac{2}{t_{M=3}/t_{M=1} - 1} \end{cases}$$
(4.25)

 k_2 – hallituse kasvu aeglustumise koefitsent, mis arvutatakse valemi 4.26 abil;

$$k_2 = max[1 - exp[2.3 \cdot (M + M_{max})], 0]$$
(4.26)

Kus:

M-hallitusindeks;

M_{max} – hallitusindeksi maksimaalne väärtus.

Indeks	Hallituse kasvumäära kirjeldus			
0	Kasv puudub			
1	Üksikud hallituse kolded materjali pinnal (mikroskoobiga nähtavad)			
2	Mitmed lokaalsed hallituse kolded materjali pinnal (mikroskoobiga nähtavad)			
3	Silmaga nähtavad hallituse kolded materjali pinnal, < 10% kaetud, või < 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldes			
4	Silmaga nähtavad hallituse kolded materjali pinnal, < 10%-50% kaetud, või > 50% kaetud mikroskoobiga vaadeldes			
5	Rohke silmaga nähtav hallituse kasv materjali pinnal, > 50% kaetud			
6	Tihe ja rohke hallituse kasv materjali pinnal, ligi 100% kaetud			

Tabel 4.7. Viitaneni hallitusindeksi väärtuste täpsustatud kirjeldus (Viitanen et al., 2011)

5. TULEMUSED JA TULEMUSTE HINDAMINE

5.1 Katsetulemused ja nende hindamine

Kliimakambri katse käigus registreeritud suhtelise niiskuse tulemused katseseinte erinevates kihtides on kujutatud allolevatel joonistel. Kõikide katseseinte suhteliste niiskuste väärtused kihis 1 (kipsplaadi ja seespoolse soojustuse vahelises kihis) on näidatud joonisel 5.1. Jooniselt on näha, et antud kihis on katseseinte mõõtmistulemused võrdlemisi sarnased, kus ainult katseseina CLT13MW suhteline niiskus on ≈2-3% madalam kui teistes katseseintes. Kuna seestpoolt olid kõik katseseinad kaetud kipsplaadiga ning ääretingimused olid kõigi seinte puhul ühesugused, siis ei tohiks katseseinte mõõtmistulemuste vahel suuri erinevusi olla, nagu näitavad ka joonisel saadud suhtelise niiskuse väärtused. Graafikult on näha, et katseseina CLT20PIR olev andur on ajavahemikus 10-38 päeva näidanud ebakorrektseid tulemusi, mis on tingitud anduri rikkest. Pärast andurile restardi tegemist näitas andur taas korrektseid tulemusi.





Seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) suhtelise niiskuse mõõtmistulemused katseseinte kohta on näidatud joonisel 5.2. Jooniselt on näha, et katseseinte CLT13MW ja CLT13PIR suhtelise niiskuse erinevus antud kihis on ≈7%. Katseseina CLT13MW osas puuduvad mõõtmistulemused katseperioodi esimese 23

päeva kohta anduri rikke tõttu. Nii katseseinas CLT13MW kui ka seinas CLT13PIR oli paigaldatud kuiv CLT-paneel, mille algniiskused erinesid teineteisest marginaalselt.

Jooniselt 5.2 on näha, et juba katseperioodi algusest alates on seinas CLT13PIR suhteline niiskus kõrgem kui seinas CLT13PIR. Kõrgem suhteline niiskus näitab, et niiskuse väljakuivamine läbi seespoolse soojustuse Kingspan Therma TP10 on takistatud materjali kõrge difusioonitakistuse tõttu. Kuna katset ei käivitatud kohe pärast katseseinte valmis ehitamist, siis on võimalik, et niiskuse eraldumine tarinditest algas juba enne katseperioodi algust, mistõttu on näha ka oluline vahe suhtelise niiskuse mõõtmistulemustes. Võib järeldada, et Isover Vario InLiner soojustus võimaldab tarindist niiskusel eralduda ka sissepoole, samal ajal kui Kingspan Therma TP10 soojustuse soojustuse taha. Samal ajal aga on näha ka katseseina CLT13PIR puhul antud kihist suhtelise niiskuse taseme mõningane langus, mis võib olla tingitud veeauru liikumisest külgedel olevate ebatiheduste kaudu, kuna läbi alumiiniumlaminaadiga kaetud Kingspan Therma TP10 materjali veeauru liikumine on praktiliselt võimatu.

Katseseinte CLT20MW ja CLT20PIR puhul suhtelise niiskuse väärtuste omavaheline erinevus kihis 2 on ≈10%. Jooniselt on näha, et juba katseperioodi alguses on seina CLT20PIR suhteline niiskus oluliselt kõrgem kui seinas CLT20MW. Katseseintesse paigaldatud CLT-paneelid olid juba paigaldamise hetkel erineva algniiskusega, kus CLT20PIR seina paigaldatud CLT-paneel oli niiskem kui CLT20MW seina paigaldatud CLT-paneel (vt Tabel 4.1). Kuigi katseseina CLT20PIR suhteline niiskus on oluliselt kõrgem, siis on katseperioodi vältel näha suhtelise niiskuse vähenemist, mis viitab niiskuse väljakuivamisele tarindist läbi servades või kinnituskruvide juures olevate lekkekohtade, kuna Kingspan Therma TP10 ise on kõrge difusioonitakistusega materjal. Mõlema katseseina puhul, kuhu paigaldati niisked CLT-paneelid, on näha, et suhteline niiskuse tase antud kihis on väga kõrge ning selliste tingimuste pikaajalisel kestusel soodsa temperatuuri korral on oht puidu pinnale hallituse tekkeks.

Jooniselt 5.2 on näha, et niiskete CLT-paneelidega seinte CLT20MW ja CLT20PIR suhtelise niiskuse tase langeb sarnase kiirusega. Mõlema seina puhul on suhtelise niiskuse alanemine teostatud katseperioodi vältel aeglane, mistõttu antud katsetulemuste põhjal võib arvata, et väga niiske CLT-paneeli puhul ei saa eelistada üht seespoolset soojustusmaterjali teisele.





CLT-paneeli keskel (kiht 3) olevad suhtelise niiskuse mõõtetulemused on toodud joonisel 5.3. Jooniselt on näha, et mõõtmistulemused katseperioodi esimese 23 päeva kohta puuduvad katseseinte CLT13MW ja CLT13PIR kohta. Kuna tegemist oli seinatarinditega, kuhu paigaldati niisutamata CLT-paneelid siis olemasolevate katseandmete põhjal võib eeldada, et suhteline niiskus vaadeldavas kihis oli mõlemas tarindis praktiliselt ühesugune ning muutus kogu perioodi vältel ühtlaselt. Graafikult on näha, et kihis 3 seinte CLT13MW ja CLT13PIR suhteline niiskus ei erine oluliselt. Vaadeldes nende seinte suhtelise niiskuse mõõtetulemusi kihis 2 (vt Joonis 5.2), siis on seal suhtelise niiskuse erinevus katseseinte vahel suur. See on märgiks, et katseseinast CLT13PIR on veeaurutiheda seespoolse soojustuse tõttu niiskuse kuivamine tarindist sissepoole oluliselt raskendatud ning niiske keskkond tekib soojustuse ja CLT-paneeli vahelisse kihti.

Katseseintes CLT20MW ning CLT20PIR on paneelid märgunud erinevalt, kuna CLTpaneeli keskel on seinte suhtelise niiskuse tasemed erinevad. Katseseinas CLT20PIR on suhteline niiskus oluliselt kõrgem kui katseseinas CLT20MW. Võrreldes omavahel suhtelise niiskuse mõõtmistulemusi kihis 2 (vt Joonis 5.2) ja kihis 3, siis on näha, et kihis 3 on suhteline niiskus madalam kui kihis 2. Mõõtmistulemused viitavad asjaolule, et CLT-paneelid lühiajalisel märjas keskkonnas viibimisel (paneele kasteti kahenädalase perioodi vältel) märgub ebaühtlaselt. CLT-paneeli keskmise kihi suhteline niiskus on oluliselt madalam paneeli välimiste kihtide suhtelisest niiskusest. See võib olla tingitud CLT-paneeli kihtide ühendamiseks kasutatud liimi kõrgest suhtelisest difusioonitakistustegurist, samuti ka paneelide paiknemisest basseinis kastmise ajal. Võis juhtuda, et teatud kohtadesse kogunes vett rohkem aluspinna erineva kalde vms tõttu.





Katseseinte suhtelise niiskuse mõõtmistulemused CLT-paneeli ja välispoolse soojustuse vahelises kihis (kiht 4) on toodud joonisel 5.4. Jooniselt on näha, et seintes CLT20MW ja CLT20PIR, kuhu paigaldati eelnevalt niisutatud CLT-paneelid, on niiskusel võimalik eralduda tarindist väljapoole. Antud seinte algniiskus langeb nelja nädala jooksul oluliselt, mis näitab, et 200 mm paksuse mineraalvillast soojustusekihi ning tuuletõkkevillaga lahendus on niiskustehniliselt toimiv. Graafikult on näha, et kõikide katseseinte suhtelised niiskused on katseperioodi lõpuks valdavalt sarnasel tasemel.





Välispoolse mineraalvilla ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) suhtelise niiskuse mõõtmistulemused on esitatud joonisel 5.5. Jooniselt on näha, et kõigi katseseinte suhtelised niiskused antud kihis on suhteliselt sarnased. Kuna tegemist on tarindi välispoolseima kihiga, siis on selles kihis mõõtmistulemused suurel määral sõltuvad välistest ääretingimustest, mistõttu ka katseseinte tulemused on võrdlemisi sarnased.



Joonis 5.5. Katseseinte suhtelise niiskuse mõõtmistulemused kihis 5

5.2 Mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Alapeatükkides olevatel joonistel on toodud kõigi katseseinte mõõtmistulemused ning vastavate arvutusmudelite tulemused. Tarindi eri kihtide andmed on märgitud erinevat värvi joonega. Katsetulemused on joonisel esitatud pideva joonena ning arvutuslikud tulemused sama värvi katkendjoonena. Esitatud on seinte temperatuuri, soojusvoo, veeauru osarõhkude ning suhtelise niiskuse võrdlusjoonised.

5.2.1 Katseseina CLT13MW mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseina CLT13MW temperatuuri katselised ja arvutuslikud graafikud tarindi erinevates kihtides on toodud joonisel 5.6. Katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmine erinevus tarindi erinevates kihtides on Δt = -0,16 °C. Kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Isover Vario InLineri vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemustega võrreldes on Δt = 0,31 °C. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste son Δt = 0,54 °C. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes on Δt = 0,02 °C. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine

erinevus katse käigus registreeritud tulemuste suhtes on Δt = 0,65 °C. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemusel saadud andmetega on Δt = - 0,36 °C. Välis- ja sisepinna arvutuslikud temperatuurid kattusid katsetulemustega täielikult, kuna arvutusmudelis kasutati ääretingimusena katseandmeid.

Eeltoodud materjalikihtide keskmiste erinevuste tulemustest selgub, et kõige enam erinevad katselised- ja arvutuslikud temperatuurid kihis 4, mis võib olla tingitud mineraalvilla paigalduse mõningasest ebakorrektsusest katseseina. Mineraalvill paigaldati kahes kihis ning kuna materjali laius ei klappinud täpselt katseseina laiusega, siis tekkisid ka püstvuugid. Hoolimata sellest, et püstvuugid paiknesid omavahel nihkes võis see siiski osaliselt olla põhjuseks, miks arvutusmudeli kohaselt on antud kihis kõrgem temperatuur. Lisaks võis mõjutada tulemust ka tuuletõkkevilla püst- ja horisontaalvuukide tuuletõkketeibiga katmata jätmine (kuigi materjalitükid olid tihedalt koos), mistõttu tuuletõkkevilla soojuslikud omadused olid pisut halvemad.

Joonisel 5.6 ning ka katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmistest erinevustest on näha, et Delphiniga arvutades on temperatuuriväärtused tarindi kihtides katsetulemustest natuke kõrgemad. Erandiks siinkohal on kiht 3 (CLT-paneeli keskmine kiht) ning kiht 5 (tuuletõkkevilla ja soojustuse vaheline kiht), kus arvutuslikud temperatuuriväärtused olid madalamad katselistest väärtustest.

Kuna kiht 3 arvutustulemuste erinevus katsetulemuste suhtes oli väga väike, kõigest Δt = -0,02 °C, siis võib põhjuseks olla anduri jaoks katseseina keskele puuritud ava paigutus. Võis juhtuda, et puurimise ajal oli puur mõningal määral viltu, mistõttu andur ei sattunud täpselt keskele, vaid paneeli keskmest pisut sisekliima poole. Samal ajal aga arvutusmudelis on kiht 3 määratud täpselt CLT-paneeli keskele, mis võib olla põhjuseks, miks erinevalt teistest kihtidest näitab arvutusmudel paneeli keskel olevas kihis katseandmetest madalamat temperatuuri.

Kiht 5 erinevus võib olla tingitud kas lihtsalt anduri mõõteveast, arvutusmudelis tuuletõkkevillale sätestatud omaduste erinevusest katses kasutatud materjali omadustest või mõlema variandi koosmõjust tingituna.

CLT13MW katseseina temperatuuri arvutustulemuste keskmise erinevuse põhjal katsetulemustesse võib arvutusmudeli täpsusega rahule jääda, kuna katsetulemusi registreerinud kihtide vahel paiknenud andurite mõõtetäpsus on t= ±0,3°C. Valdav osa kihtide arvutustulemustest jääb enam-vähem nendesse piiridesse.



Joonis 5.6. Seina CLT13MW katselised ja arvutuslikud temperatuurid

Katseseina CLT13MW katselised ja arvutuslikud soojusvoo tulemused on toodud joonisel 5.7. Kuigi kliimakambri katse alguseks oli 20.01.2018, siis soojusvoo mõõtmistulemused on olemas vahemikus 20.02.2018-16.04.2018 (graafikul päevad 31-86), kuna katse algusajal ei olnud veel katse tarbeks tellitud soojavooplaadid kohale jõudnud. Katseliste ja arvutuslike andmete võrdlusel on aluseks võetud ajavahemikus 20.02.2018-16.04.2018 kogutud andmed, kuna on olemas nii katselised kui ka arvutuslikud andmed. Soojavoo arvutus- ja katsetulemused võib lugeda peaaegu täielikult kattuvateks (vt Joonis 5.7). Arvutusliku ja katse käigus registreeritud soojavoo tulemuste vaheline keskmine erinevus on minimaalne Δq = 0,059 W/m². Katses kasutatud soojavooplaadi mõõtetäpsus on ±3% ning arvutustulemuse ja katsetulemuse keskmine vahe, mis on 2,49%, jääb mõõtetäpsuse piiridesse.





Veeauru osarõhkude arvutuslikud ning katsetulemuste põhjal arvutatud väärtused tarindi erinevates kihtides on toodud joonisel 5.8. Kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Isover Vario InLineri vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemustega võrreldes oli Δp = 66,8 Pa. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus saadud tulemuste suhtes oli Δp = 24,5 Pa. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katset käigus saadud tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes oli Δp = -80,6 Pa. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katset suhtes oli Δp = 92,5 Pa. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemuste saadud andmetega oli Δp = 11,4 Pa.

Nagu temperatuurigraafiku puhul (vt. Joonis 5.6), on ka veeauru osarõhkude katseandmete põhjal arvutatud ning arvutusmudeliga saadud väärtuste keskmine erinevus kõige suurem kihis 4 (CLT-paneeli ja välimise soojustuse vaheline kiht). Kuna veeauru osarõhu väärtus on otseses sõltuvuses temperatuurist ning suhtelisest niiskusest, siis on mõistetav, et suurim erinevus on kihis, kus ka katseliste ning arvutuslike temperatuuride keskmine erinevus oli kõige suurem. Joonisel 5.8 ning ka eelpool toodud katse- ja arvutustulemuste keskmisest erinevusest on näha, et arvutusmudeliga arvutatud veeauru osarõhud on suuremad kui katseandmete põhjal

arvutatud veeauru osarõhu väärtused. Erandiks on CLT-paneeli keskmine kiht (kiht 3), kus arvutuslikud veeauru osarõhkude väärtused on kogu katseperioodi vältel reeglina madalamad katseandmete põhjal arvutatud väärtustest.



Joonis 5.8. Seina CLT13MW katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

Suhtelise niiskuse katselised ja arvutuslikud graafikud on toodud joonisel 5.9. Kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Isover Vario InLineri vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemustega võrreldes oli $\Delta \phi$ = 1,87%. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus saadud tulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = -0,51%. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste keskmine erinevus katsetulemuste soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = -4,0%. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste katse käigus registreeritud tulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = 3,92%. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemusel saadud andmetega on $\Delta \phi$ = 2,07%.

Jooniselt on näha (vt Joonis 5.9), et ajavahemikus 46-66 päeva (talvised kliimatingimused) katseliste ja arvutuslike graafikute erinevused tunduvalt suuremad kui sellele perioodile eelnevas või järgnevas ajavahemikus. Kõige suurem on erinevus kiht 4 ($\Delta \phi$ = 9,6%) ja kiht 5 ($\Delta \phi$ = 4,4%) tulemuste vahel. Nendes kihtides on arvutustarkvara külma perioodi korral hinnanud suhtelise niiskuse tunduvalt kõrgemaks kui katsetulemused seda näitasid. Osaliselt võib suur erinevus olla tingitud

materjaliomaduste erinevusest, teisalt aga ka võib põhjus seisneda asjaolus, et tegelik konstruktsioon ei olnud niivõrd õhutihe, kui arvutustarkvara hinnangul ning tänu sellele ka katseseinas niiskuse väljakuivamine toimus kiiremini.

Kui arvestada, et mõõteanduride suhtelise niiskuse mõõtmistäpsus on vahemikus RH= ±1,5...2,0%, siis üldiselt võib hinnata arvutusmudeli täpsuse rahuldavaks, kuna keskmine erinevus katsetulemustest erinevates kihtides jääb piiridesse ±4%.





Lisa 2 on toodud katseseinas CLT13MW temperatuuri, suhtelise niiskuse ning veeauru osarõhu arvutuslike ja katseliste väärtuste muutumine üle tarindi ristlõike. Kasutatud on talvise kliimaperioodi tulemusi (katseperioodi 60.päev), kuna sel perioodil ääretingimuste erinevused olid kõige suuremad ning sellest tulenevalt joonistub temperatuuri, suhtelise niiskuse ning veeauru osarõhu väärtuste muutumine üle tarindi paremini välja. Vaadeldes lisas toodud jooniseid, on näha, et nii suhtelise niiskuse kui veeauru osarõhu muutumist tarindi ristlõikes iseloomustava joone amplituud on väiksem katsetulemusi iseloomustava joone omast. See võib olla tingitud sellest, et tegelikkuses on tarindi kihtide difusioonitakistus väiksem arvutusmudelis kasutatud väärtustest. Veeauru osarõhu muutumist iseloomustav joon näitab, et veeauru osarõhk on suurim seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis ning CLT-paneeli keskel. Kuna veeauru osarõhu joon langeb nii sise- kui välispinna poole, tähendab see seda, et paneelist niiskuse väljakuivamine toimub mõlemas suunas. CLT-paneeli ja seespoolse soojustuse

vahelises kihis on arvutuslik ja katseline suhteline niiskus samaväärsed ning arvutusmudeliga saadud tulemused tarindi hallituse tekke seisukohalt kõige kriitilisemas kihis võib lugeda usaldusväärseteks.

5.2.2 Katseseina CLT13PIR mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Joonisel 5.10 on näidatud katseseina tähistusega CLT13PIR katselised ja arvutuslikud temperatuurigraafikud tarindi erinevates kihtides. Katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmine erinevus tarindi erinevates kihtides on Δ t= 0,24 °C. Kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Kingspan Therma TP10 vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemustega võrreldes on Δt = 0,12 °C. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus saadud tulemuste suhtes on Δt = 0,28 °C. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes on Δt = 1,03 °C. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus registreeritud tulemuste suhtes on Δt = 0,46 °C. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemusel saadud andmetega on Δt = -0,22 °C.

Kõige suurem erinevus arvutuslike ja katseliste temperatuuride osas tekkis kihis 3 (CLTpaneeli keskel), kus keskmine erinevus tulemuste vahel on üle kahe korra suurem kui teistes materjalikihtides. Nii suur erinevus võis olla tingitud nii anduri paiknemisest paneelis (ava puurimise täpsus) kui ka katseseintesse paigaldatud paneelide omaduste varieeruvusest. Kuna puit on looduslik materjal ning raske on tagada täiesti ühtlaste omadustega toodangut, siis võib ka see olla üheks põhjuseks. Seda enam, et arvutusmudelites kasutatud materjaliomadused on kõikide seinatüüpide mudelites täpselt ühesugused, v.a puidu algniiskus (vt Tabel 4.4).

Sarnaselt katseseina CLT13MW tulemustele on ka seina CLT13PIR puhul näha, et arvutustarkvara abil saadud temperatuurid on kõrgemad kui katsetulemustes saadud väärtused. Selle põhjuseks võib olla nii katseandmeid salvestanud andurite mõõteviga kui ka katseseinte ehituskvaliteet (kahes kihis paigaldatud välispidine soojustus, tuuletõkkeplaadi teipimata vuugid, materjaliomaduste tegelike väärtuste varieeruvus arvutuslikest väärtustest).

Võttes arvesse andurite mõõtmistäpsust t= 0,3 °C, võib hinnata arvutusmudeli abil saadud temperatuuriväärtused võrreldes katusetulemustega usaldusväärseteks.





Joonis 5.11 on toodud katseseina CLT13PIR arvutusliku ning katse käigus soojavooplaadiga mõõdetud soojusvoograafikud. Kuigi kliimakambri katse algas 20.01.2018, siis soojusvoo mõõtmistulemused on olemas vahemikus 20.02.2018-16.04.2018 (graafikul päevad 31-86), kuna katse algusajal ei olnud veel katse tarbeks tellitud soojavooplaadid kohale jõudnud. Katseliste ja arvutuslike andmete võrdlusel on aluseks võetud ajavahemikus 20.02.2018-16.04.2018 kogutud andmed, kuna selle perioodi kohta on olemas nii katselised kui ka arvutuslikud andmed.

Arvutusmudeli abil leitud soojusvoo väärtuste keskmine erinevus katse käigus mõõdetud väärtuste suhtes on $\Delta q = 0,15 \text{ W/m}^2$, mis protsentuaalselt teeb katse- ja arvutustulemuste erinevuseks $\approx 6-7\%$. Katseseina sisepinnale paigaldatud soojavooplaadi mõõtmistäpsuseks on määratud ±3%, mis tähendab, et arvutus- ning katsetulemuste vaheline erinevus ei mahu mõõtmisvea piiridesse.

Mõõtmistäpsusest pisut suurem erinevus on tingitud kohatistest katsetulemuste hüppelistest muutumistest, mis võrreldes katselise graafiku ülejäänud tulemustega ei ole korrektsed väärtused, kuid mida keskmise vea arvutamisel ei ole välja arvatud. Arvestades Joonisel 5.11 toodud arvutusliku ja katselise soojusvoo graafikute visuaalset kattuvust, siis võib arvutusmudeli tulemused lugeda tõepäraseks.



Joonis 5.11. Seina CLT13PIR katseline ja arvutuslik soojusvoog

Katseseina veeauru osarõhkude arvutuslikud ning katseandmete põhjal arvutatud väärtused on toodud joonisel 5.12. Kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Kingspan Therma TP10 vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemustega võrreldes on Δp = -2,1 Pa. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus saadud tulemuste suhtes on Δp = -30,6 Pa. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste keskmine erinevus katsetulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes on Δp = -2,5 Pa. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus registreeritud tulemuste suhtes on Δp = 7,9 Pa. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemusel saadud andmetega on Δp = -17,8 Pa.

Kõige rohkem erinevad katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhu väärtused kihis 2 (seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vaheline kiht), kus arvutusmudeli abil saadavad tulemused näitavad selles kihis madalamat veeauru osarõhku kui katselised tulemused. Arvutusmudeli kohaselt on Isover Vario InLineri veeauru läbilaskvus suurem tegelikust veeauru läbilaskvusest.



Joonis 5.12. Seina CLT13PIR katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

CLT13PIR katseseina katselised ning arvutuslikud suhtelise niiskuse graafikud eri kihtide kohta on toodud joonisel 5.13. Kipsplaadi ning seespoolse Kingspan Therma TP10 vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus võrreldes katsetulemustega on $\Delta \phi$ = -0,63 %. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus saadud tulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = -2,64 %. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katsetulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = -3,68%. CLT-paneeli ning välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike tulemuste keskmine erinevus katse käigus registreeritud tulemuste suhtes on $\Delta \phi$ = -0,65%. Välimise soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutuslike tulemuste erinevus võrreldes katse tulemusel saadud andmetega on $\Delta \phi$ = -1,02%.

Jooniselt on näha (vt Joonis 5.13), et ajavahemikus 46-66 päeva (talvised kliimatingimused) katseliste ja arvutuslike graafikute erinevused on märgatavalt suuremad kui sellele perioodile eelnevas või järgnevas ajavahemikus. Kõige suuremad on erinevused kiht 2 ($\Delta \phi$ = -6,5%), kiht 3 ($\Delta \phi$ = -5%) ja kiht 4 ($\Delta \phi$ = 5,7%) tulemuste vahel. Nendes kihtides on arvutustarkvara külma perioodi korral hinnanud suhtelise niiskuse kihtides 2 ja 3 tunduvalt madalamaks ning kihis 4 tunduvalt kõrgemaks kui katsetulemused seda näitasid.

Kui arvestada, et mõõteanduride suhtelise niiskuse mõõtmistäpsus on vahemikus RH= $\pm 1,5...2,0\%$, siis üldiselt võib hinnata arvutusmudeli täpsuse rahuldavaks, kuna keskmine erinevus katsetulemustest on erinevates kihtides alla $\pm 4\%$.



Joonis 5.13. Seina CLT13PIR katselised ja arvutuslikud suhtelised niiskused

Lisa 2 toodud katseseina CLT13PIR talvise kliimaperioodi (katseperioodi 60.päev) katseliste ja arvutuslike tulemuste põhjal koostatud temperatuuri, suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu muutumist üle tarindi ristlõike iseloomustavate graafikute põhjal on näha, et nagu seina CLT13MW puhul, on ka selle katseseina arvutuslike tulemuste põhjal koostatud suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu joonte amplituud väiksem kui katsetulemuste põhjal koostatud joontel. See tähendab, et katseseinas oleva CLT-paneeli seespoolse kihi suhteline niiskus on kõrgem ning välispoolse kihi suhteline niiskus madalam kui arvutustulemused näitavad. Selgub, et CLT-paneeli ja seespoolse soojustuse vahelises kihis, mis on tarindi niiskustehnilise toimivuse seisukohalt kõige kriitilisem kiht, on suhteline niiskus kõrgem kui arvutustulemused seda näitavad ning seda tuleb arvutusmudeliga edasiste arvutuste tegemisel kindlasti arvesse võtta. Arvutusmudeli põhjal kuivab niiskus tarindist sissepoole suuremal määral kui katsetulemuste põhjal.

5.2.3 Katseseina CLT20MW mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseina CLT20MW katselised ja arvutuslikud temperatuurigraafikud tarindi erinevates kihtides on toodud joonisel 5.14. Seina kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Isover Vario InLineri vahelises kihis (kiht 1) oli katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmiseks erinevuseks Δt = 0,21 °C, mis jääb antud kihti paigaldatud anduri mõõtmistäpsuse piiridesse.

Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katsetulemuste keskmine erinevus on Δt = 0,47 °C. CLT-paneeli keskel paikneva kihi (kiht 3) katseliste ja arvutuslike temperatuuride erinevuseks on Δt = 0,45 °C. CLT-paneeli ning välispidise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmiseks erinevuseks saadi Δt = 0,63 °C. Soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi (joonisel kiht 5) katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmiseks erinevuseks on saadud Δt = -0,24 °C.

Võrreldes katseliste ja arvutuslike tulemuste keskmiseid erinevusi erinevates kihtides, siis on näha, et üldjuhul on arvutuslik temperatuur kõrgem kui katseline temperatuur, mis võib olla tingitud katses kasutatud puidu omaduste ebaühtlusest või niiskussisalduse erinevusest kihtides. Kõige suurem erinevus katseliste ja arvutuslike tulemuste vahel oli kihis 4 (CLT-paneeli ja mineraalvilla vaheline kiht), mis ilmselt on tingitud asjaolust, et tuuletõkkevilla vuugid jäid kiire ajalise graafiku tõttu enne katse algust tuuletõkketeibiga katmata. Katseliste ja arvutuslike temperatuuride pisut suurem keskmine erinevus osades kihtides võib olla tingitud katseseina väiksemast õhutihedusest, mistõttu katseline temperatuur on pisut madalam arvutusmudeliga saadavatest tulemustest.



Joonis 5.14. Seina CLT20MW katselised ja arvutuslikud temperatuurid

Katseseina soojusvoo arvutuslikud ning katselised tulemused on toodud joonisel 5.15. Kuigi kliimakambri katse alguseks oli 20.01.2018, siis soojusvoo mõõtmistulemused on olemas vahemikus 20.02.2018-16.04.2018 (graafikul päevad 31-86), kuna katse algusajal ei olnud veel katse tarbeks tellitud soojavooplaadid kohale jõudnud. Katseliste ja arvutuslike andmete võrdlusel on aluseks võetud ajavahemikus 20.02.2018-16.04.2018 kogutud andmed, kuna on olemas nii katselised kui ka arvutuslikud andmed.

Jooniselt on hästi näha, et arvutuslike ja katseliste tulemuste kokkulangevus on peaaegu täpne. Katseliste ja arvutuslike soojusvoogude väärtuste keskmine erinevus on Δq = - 0,052 W/m² (2%), mis jääb ka soojavooplaadi mõõtmistäpsuse (±3%) piiridesse.





Katseandmete põhjal arvutatud ning arvutuslike veeauru osarõhkude graafikud CLT20MW katseseina erinevates kihtides on toodud joonisel 5.16. Tarindi kipsplaadi ja seespoolse soojustuse Isover Vario InLiner vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on Δp = 4,3 Pa. Seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katseliste väärtuste keskmiseks erinevuseks on saadud Δp = 164 Pa. CLT-paneeli keskmises kihis (kiht 3) saadud katseliste ja arvutuslike veeauru osarõhkude keskmine erinevus on Δp = 116,9 Pa. CLT-paneeli ja välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike ja katseliste veeauru osarõhkude keskmine erinevus on Δp = 16,9 Pa. CLT-paneeli ja välimise soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutuslike ja katseliste veeauru osarõhu väärtuste keskmiseks erinevuseks on saadud Δp = 4,5 Pa. Soojustuse ja tuuletõkkevilla vahelise kihi arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmine erinevus on Δp = 39 Pa.

Üheks põhjuseks, miks kiht 2 ja kiht 3 veeauru osarõhkude arvutuslikud ja katselised väärtused suurel määral erinevad võib olla ka asjaolu, et mudelis kasutatud liimikihi suhtelise difusioonitakistusteguri väärtus on teine katseseintes kasutatud liimikihi suhtelisest difusioonitakistustegurist.





Seina CLT20MW katselised ja arvutuslikud suhtelise niiskuse graafikud on toodud joonisel 5.17. Kipsplaadi ja seespoolse soojustuse Isover Vario InLineri vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike ja katseliste suhtelise niiskuse väärtuste keskmiseks erinevuseks saadi $\Delta \phi$ = -0,26%. Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmine erinevus oli $\Delta \phi$ = 5,34%. CLT-paneeli keskmise kihi (kiht 3) arvutustulemuste keskmine erinevus katses käigus saadud väärtustest on $\Delta \phi$ = 3,86%. CLT-paneeli ning välispoolse soojustuse vahelise kihi (kiht 4) arvutustulemuste keskmine erinevus katsetulemuste keskmine erinevus katses käigus saadud väärtustelemuste keskmine erinevus katsetulemuste keskmine erinevus katsetule

Joonisel 5.17 on näha, et kiht 2 ja kiht 3 arvutuslikud ja katselised suhtelised niiskused algavad ühest punktist, kuid katseperioodi lõpuks on arvutuslike ja katseliste väärtuste erinevus üsna suur. Kiht 2 puhul nii arvutuslik kui katseline suhteline niiskus vähenevad, kuid erineva kiirusega. Katseandmete põhjal joonistatud graafikust on näha, et paneeli niiskus kuivab välja kiiremini kui arvutusmudeli põhjal joonistatud graafik seda näitab. Selline erinevus võib olla tingitud sellest, et katseseinast kuivas üsna märgatavalt niiskust välja ka sissepoole tänu tarindis olevatele lekkekohtadele (nt kruviaugud kipsplaadi kinnitamisest, aurutõkketeibi paigalduse ebakorrektsus vms), mis soodustasid niiskuse väljakuivamist.

Kiht 3 suhtelise niiskuse arvutuslik ja katseline graafik kattuvad pea täielikult katseperioodi esimesel neljal nädalal (0-30 päeva), kuid siis arvutusliku suhtelise niiskuse väärtused võrreldes katseliste väärtustega suurenevad hüppeliselt ning selline erinevus jääb püsima kuni katseperioodi lõpuni. Võibolla on selline järsk muutumine tingitud talvistele kliimatingimustele üleminekust või siis ka tavalise puidu ja CLT-paneeli erinevast kuivamisrežiimist.

Kiht 4 suhtelise niiskuse arvutuslikud ja katselised graafikud erinevad samuti üsna märgatavalt nii oma kuju kui ka väärtuste poolest. Arvutusliku graafiku puhul on märgata, et katseperioodi esimese nelja nädala jooksul kihi niiskustase väheneb astmeliselt, samal ajal kui katselisel graafikul suhtelise niiskuse tase väheneb sujuvalt. Suurem erinevus tekib talviste kliimatingimuste ajal, kus arvutuslik suhteline niiskus on kõrgem kui katseline suhteline niiskus. Selline graafikute erinevus võib olla tingitud tuuletõkkevilla vuukide teipimata jätmisest, erinevast väljakuivamisrežiimist arvutuslikul materjalil või ei vastanud väliskliimapoolse CLT-paneeli puidukihi algniiskus päris täpselt sellele niiskusele, mis oli katseseina CLT-paneeli samas kihis.

Kuigi suhtelise niiskuse arvutuslike ja katseliste väärtuste keskmised erinevused on suuremad kui katseseina paigaldatud andurite mõõtmistäpsus ±1,5...2% siis üldiselt jääb tulemuste erinevus ±5% piiridesse, mille võib lugeda piisavaks täpsuseks, kuna ei ole võimalik saavutada 1D arvutusmudeliga täpselt samasuguseid tulemusi, mis on katseseintes mõõdetud, kus tarindis olev niiskus võib lisaks ühedimensioonilisele liikumisele väljuda tarindist ka külgede kaudu. Katseandmed sõltuvad paljudest kõrvalistest asjaoludest, mida ükski arvutusmudel ei suuda täielikult arvestada.





Eeltoodud katseseina CLT20MW arvutuslikke ja katseandmeid võrreldes võib öelda, et üldiselt jäävad kõik arvutuslike tulemuste erinevused katsetulemustega võrreldes mõistlikesse piiridesse. Suuremad on erinevused arvutusmudeli veeauru osarõhkude ning suhtelise niiskuse graafikute osas. Temperatuuri ning soojusvoo katselised ning arvutuslikud graafikud langevad kokku üsna täpselt. Kuna arvutusmudel vaatleb niiskuse ning soojusenergia liikumist läbi tarindi ainult ühes suunas ning katsekeskkonnas võib niiskuse ning soojuse liikumine toimuda hoolimata vuukide tihendamisest mitmes suunas, siis paratamatult tuleb arvestada teatud veaprotsendiga arvutusmudeli tulemustes.

Lisa 3 toodud katseseinas CLT20MW talvise kliimaperioodi (katseperioodi 60.päeva andmete kohaselt) arvutusliku ja katselise temperatuuri, suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu muutumist üle ristlõike iseloomustavate joonte järgi on näha, et mõlemad jooned on sarnase kujuga, kuid on teineteise suhtes nihkes, kus arvutuslikud väärtused on kõrgemad kui katselised. See võib olla tingitud mõningasest CLT-paneeli algniiskuse erinevusest katseseina ja arvutusmudelis määratud väärtuste vahel.

5.2.4 Katseseina CLT20PIR mõõtmistulemuste võrdlus arvutustega

Katseseina tähistusega CLT20PIR katselised ja arvutuslikud temperatuurigraafikud on esitatud joonisel 5.18. Seina kipsplaadi ning seespoolse soojustuse Kingspan Therma

TP10 vahelises kihis (kiht 1) oli katseliste ja arvutuslike temperatuuride keskmiseks erinevuseks Δt = 0,37 °C, mis jääb peaaegu antud kihti paigaldatud anduri mõõtmistäpsuse piiridesse. Seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katseliste temperatuuride keskmine erinevus on Δt = 0,69 °C. CLT-paneeli keskmises kihis (kiht 3) mõõdetud ja arvutatud katseliste ning arvutuslike tulemuste keskmiseks erinevuseks saadi Δt = 0,65 °C. CLT-paneeli ning välimisele poolele paigaldatud mineraalvilla vahelise kihi (kiht 4) saadud arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on Δt = 0,83 °C. Soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on Δt = 0,83 °C. Soojustuse ning tuuletõkkevilla vahelise kihi arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on saadud Δt = -0,09 °C. Suurim erinevus katseliste ja arvutuslike tulemuste vahel tekkis kiht 4 puhul, üsna suur erinevus tulemuste vahel oli ka kihtides 2 ning 3.

Võrreldes erinevate kihtide arvutuslikke ja katseliste andmetega graafikuid, on näha, et kõigis kihtides (v.a kiht 5) on arvutustarkvara abil saadud temperatuuriväärtused kõrgemad katses saadud väärtustest. Graafikute ühiseks jooneks on veel, et talvise kliimaperioodi ajal kõigis kihtides arvutuslike ja katseliste graafikute erinevused suurenevad. Selline seaduspärasus võib olla tingitud kasutatud materjaliomaduste varieeruvusest, katseseinte tuuletõkkeplaadi vuukide teipimata jätmisest, mineraalvilla püstvuukidest vms), mille kaudu jahe õhk pääses kergemini tarindisse ning seetõttu on andurite poolt registreeritud tulemused erinevates kihtides madalamad arvutusmudeli abil saadud temperatuuriväärtustest.

Keskmine erinevus arvutuslike ja katseliste temperatuuriväärtuste vahel on $\Delta t = \pm 0,5^{\circ}$ C. Võttes arvesse andurite mõõtmistäpsuse t= $\pm 0,3$ °C ning eelnevalt mainitud asjaolud, mis võisid tingida tulemuste mõningase erinevuse, siis võib lugeda arvutusmudeli poolt koostatud temperatuurigraafikutes toodud andmed korrektseteks ning mudelit kasutada edasistes arvutustes.





Katseseina CLT20PIR soojusvoo arvutuslikud ning kliimakambri katse käigus mõõdetud tulemused on toodud joonisel 5.19. Kuigi kliimakambri katse alguseks oli 20.01.2018, siis soojusvoo mõõtmistulemused on olemas vahemikus 20.02.2018-16.04.2018 (graafikul päevad 31-86), kuna katse algusajal ei olnud veel katse tarbeks tellitud soojavooplaadid kohale jõudnud. Katseliste ja arvutuslike andmete võrdlusel on aluseks võetud ajavahemikus 20.02.2018-16.04.2018 kogutud andmed, kuna on olemas nii katselised kui ka arvutuslikud andmed.

Katse käigus mõõdetud ning arvutusmudeli abil saadud soojavoo väärtuste keskmiseks erinevuseks on saadud Δq = 0,01 W/m² ehk keskmiselt ±4,66%. Soojavooplaatide mõõtmistäpsuseks on ±3% ning kuna arvutuslike väärtuste keskmine erinevus katseandmetest on vaid pisut kõrgem mõõtmistäpsusest, siis võib lugeda katseseina arvutusmudeli täpsuse piisavaks, kuna keskmise erinevuse arvutamisel on arvestatud ka katseandmete kohati hüppeliselt kõrgemaks ja madalamaks muutunud väärtusi.





Katseseina CLT20PIR katseandmete põhjal arvutatud ning arvutusmudeli kaudu saadud veeauru osarõhkude graafikud on toodud joonisel 5.20. Katselised veeauru osarõhud on arvutatud andurite poolt registreeritud temperatuuri ja suhtelise niiskuse väärtuste kaudu valemite abil. Kipsplaadi ning seespoolse soojustusmaterjali Kingspan Therma TP10 vahelise kihi (kiht 1) arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on saadud Δp = 238,1 Pa.

Nii suure erinevuse põhjuseks on katseseina paigaldatud anduri poolt registreeritud valed suhtelise niiskuse väärtused perioodil (10-37 päeva), mil andur näitas neljanädalase perioodi vältel ebakorrektseid tulemusi. Pärast anduri restarti katse 37.päeval esitas andur edaspidi korrektseid tulemusi. Võtmata arvesse eelmainitud perioodi, mil katsetulemused olid vigased, siis on arvutuslike ja katseliste veeauru osarõhkude väärtuste keskmiseks erinevuseks kihis Δp = 30,8 Pa.

Seespoolse soojustusmaterjali ja CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katseliste veeauru osarõhu näitajate keskmiseks erinevuseks on saadud Δp = 66,5 Pa. Suurimad erinevused veeauru osarõhkudes tekivad talvisel kliimaperioodil, kus veeauru osarõhu arvutuslik graafik ei lange niisama järsult kui katselisel graafikul. CLT-paneeli keskmises kihis (kiht 3) saadud veeauru osarõhu katselised ja arvutuslikud väärtused erinesid teineteisest keskmiselt Δp = 29,2 Pa võrra. CLT-paneeli ning mineraalvillast soojustuse vahelise kihi (kiht 4) veeauru osarõhkude katseliste ja arvutuslike väärtuste

keskmiseks erinevuseks saadi Δp = 28,7 Pa. Mineraalvilla ja tuuletõkkevilla vahelises kihis (kiht 5) on saadud katseliste ja arvutuslike veeauru osarõhkude keskmiseks erinevuseks Δp = -20,4 Pa.

Kõige suurem erinevus arvutuslike ja katseliste veeauru osarõhu väärtuste vahel esines CLT-paneeli ja seespoolse soojustuse vahelises kihis (kiht 2). Teiste kihtide puhul on veeauru osarõhkude keskmised erinevused katseliste ja arvutuslike väärtuste vahel minimaalsed. Kuna veeauru osarõhk on kõige kõrgem kihis 2 ning kiht 1 ja kiht 3 veeauru osarõhud on tunduvalt madalamad, siis tähendab see seda, et tarindist kuivab liigne ehitusniiskus välja nii sisse- kui ka väljapoole. Kuna seespoolne soojustus Kingspan Therma TP10 on suure difusioonitakistusega materjal, läbi mille niiskuse liikumist ei esine, siis ilmselt on katsetatud tarindis teatud lekkekohad, mille kaudu oli niiskusel võimalik ka sissepoole kuivada.



Joonis 5.20. Seina CLT20PIR katselised ja arvutuslikud veeauru osarõhud

Katseseina CLT20PIR suhtelise niiskuse arvutuslike ning katseliste väärtuste graafikud on esitatud joonisel 5.21. Kipsplaadi ja seespoolse soojustuse Kingspan Therma TP10 vahelises kihis (kiht 1) mõõdetud ja arvutatud suhteliste niiskuste keskmiseks erinevuseks on saadud $\Delta \phi$ = -9,7%. Joonis 5.21 on näha, et nii suur erinevus arvutusmudeli ning katseliste tulemuste vahel on tingitud anduri vigastest näitudest ajaperioodil 10-38 päeva, mil andurit näitasid suhtelise niiskuse väärtuseks kas 100%
või 0%. Pärast andurile restardi tegemist, hakkas andur taas korrektseid tulemusi näitama. Jättes katseliste ja arvutuslike tulemuste keskmise erinevuse arvutamisel arvesse võtmata eelmainitud ajavahemiku tulemused, saame suhtelise niiskuse keskmiseks erinevuseks katse- ja arvutustulemuste vahel $\Delta \phi$ = 0,1%.

Seespoolse soojustuse ning CLT-paneeli vahelise kihi (kiht 2) arvutuslike ja katseliste väärtuste keskmiseks erinevuseks on $\Delta \phi$ = 0,5%. CLT-paneeli keskmes paikneva kihi (kiht 3) arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on saadud $\Delta \phi$ = - 2,2%. CLT-paneeli ning mineraalvilla vahelises kihis (kiht 4) saadud arvutuslike ja katseliste tulemuste keskmiseks erinevuseks on $\Delta \phi$ = -0,9%. Mineraalvilla ja tuuletõkkevilla vahelise kihi (kiht 5) arvutustulemused erinesid katsetulemustest keskmiselt $\Delta \phi$ = -1,8% võrra.

Katselisel ja arvutusmudeli kaudu saadud suhtelise niiskuse tulemusi võrreldes on näha, et arvutusmudeliga saadud väärtused on üsna sarnased katsetulemustele. Andurite mõõtetäpsus sõltuvalt anduri tüübist on vahemikus = 1.5...2% ning saadud keskmised erinevused arvutus- ja katsetulemuste vahel jäävad nendesse piiridesse, kus katse ja arvutustulemuste erinevused jäävad vahemikku ±2,2%.



Joonis 5.21. Seina CLT20PIR katselised ja arvutuslikud suhtelised niiskused Lisa 3 toodud katseseinas CLT20PIR talvise kliimaperioodi (katseperioodi 60 päeva andmete kohaselt) arvutusliku ja katselise temperatuuri, suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu muutumist üle ristlõike iseloomustavate joonte järgi on näha, et mõlemad jooned

on sarnase kujuga, kuid on teineteise suhtes nihkes, kus arvutuslikud väärtused on natuke kõrgemad kui katselised. See võib olla tingitud mõningasest CLT-paneeli algniiskuse erinevusest katseseina ja arvutusmudelis määratud väärtuste vahel, kuid üldiselt võib arvutusmudeli tulemused lugeda usaldusväärseteks.

5.3 CLT-paneeli maksimaalse algniiskuse määramine tarindis

CLT-paneeli kriitilise niiskuse leidmiseks kasutati eelnevalt kalibreeritud arvutusmudeleid ning kriitiline niiskus määrati CLT-paneeli ühtlase niiskuse korral. Hallitusindeksi arvutused on teostatud CLT-paneeli ja seespoolse soojustuse vahelises kihis (kiht 2), kuna vastavalt katse- ja arvutustulemustele on selles kihis hallitusseente kasvuks tingimused kõige soodsamad (puidu pind ning kõrge suhteline niiskus ning temperatuur).

5.3.1 Arvutusperioodi algusaja määramine

Määramaks hallitusindeksi abil kindlaks CLT-paneeli kriitilise niiskuse katsetatud seinakonstruktsioonides, uuriti esialgu, milline peaks olema arvutusperioodi algusaeg, millega arvutades tekib tarindi vaadeldavas kihis niiskustehnilise toimivuse seisukohast kõige ohtlikum olukord. Arvutusperioodi algusaja kindlaks määramise jaoks on teostatud Delphin arvutustarkvara abil ühe aasta pikkuse arvutusperioodiga hallitusindeksi arvutused, milles on kasutatud katseseinte kalibreeritud arvutusmudeleid. Mõlemas kalibreeritud arvutusmudelis määrati CLT-paneeli algniiskuseks 20%, et algusperioodide omavaheline erinevus joonistuks selgemalt välja. Leidmaks kriitiliseima arvutusperioodi algusaega, teostati eelpool nimetatud algniiskuse väärtusega ühe aastase ajaperioodiga arvutused, kus iga kord alustati arvutusperioodi erineva kuuga.

Seespoolselt Isover Vario InLineriga soojustatud seina arvutusmudeli tulemused on toodud joonisel 5.22, kus on näidatud hallitusindeksi muutumine sõltuvalt arvutusperioodi algusajast. Punase joonega on märgitud niiskustehnilise toimivuse kohalt kõige ohtlikum ning rohelise joonega kõige ohutum algusaeg. Arvutuste tulemusena selgus, et kõige väiksem hallitusindeksi väärtus saadakse kui arvutusperioodi alustada juunikuust ning kõige ohtlikum olukord tekib tarindis, kui arvutusperioodi alustada detsembrist. Edaspidistes arvutustes selle seinatüübi kriitilise niiskuse leidmiseks alustatakse arvutusperioodi detsembrikuust.



Joonis 5.22. Isover Vario InLineriga seespoolselt soojustatud katseseina hallitusindeksi arvutuse algusperioodi määramine

Seespoolselt Kingspan Therma TP10 soojustusega soojustatud seina arvutusmudeli tulemused on toodud joonisel 5.23. Arvutuste tulemusest on näha, et kõige ohutum olukord on, kui arvutusperioodi alguseks valida jaanuar ning kõige ohtlikum olukord tekib kui arvutusperioodi alustada augustis. Edaspidistes arvutustes selle seinatüübi kriitilise niiskuse leidmiseks on alustatud arvutusperioodi augustikuust.



Joonis 5.23. Kingspan Therma TP10-ga seespoolselt soojustatud katseseina hallitusindeksi arvutuse algusperioodi määramine

5.3.2 CLT-paneeli maksimaalse algniiskuse määramine tarindis

Isover Vario InLiner seespoolse soojustusega soojustatud seinatüübi hallitusindeksite graafikud CLT-paneeli erineva algniiskuse korral on toodud joonisel 5.24. Seinatarindi toimivuse hindamiskriteeriumiks oli, et hallitusindeksi väärtus peab kogu arvutusperioodi jooksul olema alla 1. Joonisel on punase katkendjoonena märgitud ka hallitusindeksi ülemise väärtuse piir, mida ületada ei ole lubatud.

Graafikult on näha, et seinte CLT15MW, CLT16MW ning CLT17MW hallitusindeksite graafikud jäävad allapoole maksimaalset lubatud piiri, mis tähendab, et hallitusohtu nendes tarindites ei teki. Joonise 5.24 põhjal saab väita, et Isover Vario InLineriga seespoolselt soojustatud tarindi puhul on CLT-paneeli maksimaalseks lubatud algniiskuseks 17%. kui CLT-paneeli niiskus tõuseb üle selle väärtuse, siis arvutustulemuste kohaselt on suur oht hallituse tekkeks puidu pinnal ning selle vältimiseks peaks võimaldama paneeli niiskustasemel alaneda vähemalt 17% -ni enne teiste materjalikihtidega kinni katmist.



Joonis 5.24. Hallitusindeksi väärtused erineva puidu algniiskuse korral seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis

Joonisel 5.25 on toodud ka suhtelise niiskuse graafikud seespoolse soojustuse ja CLTpaneeli vahelises kihis erineva puidu algniiskuse korral. Jooniselt on näha, et viie aasta pikkuse arvutusperioodi keskel on kõikide algniiskuste korral tarindi suhtelise niiskuse tase vaadeldavas kihis (kiht 2) saavutanud praktiliselt ühesuguse väärtuse. Tarindis niiskuse põhiline väljakuivamine toimub arvutusperioodi esimese aasta jooksul.



Joonis 5.25 Suhtelise niiskuse väärtused erineva puidu algniiskuse korral seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis.

Kingspan Therma TP10 soojustusmaterjaliga seespoolselt soojustatud seinatüübi hallitusindeksite graafikud CLT-paneeli erineva algniiskuse korral on toodud joonisel 5.26. Jooniselt on näha, et tarindi niiskustehnilise toimivuse tagavale kriteeriumile (hallitusindeksi väärtus alla 1) vastab sein tähistusega CLT15PIR. Võrreldes Isover Vario InLineriga soojustatud seinatarindiga on Kingspan Therma TP10-ga soojustatud seina puhul kriitiliseks paneeli algniiskuseks 15%, mis tähendab, et niiskustehnilise toimivuse seisukohast on Kingspan Therma TP10 soojustusmaterjal seespoolse soojustusena oluliselt riskantsem lahendus ning CLT-paneelidesse liigniiskuse sattumisest tuleb eriti tähelepanelikult hoiduda.

Joonisel 5.27 on näha suhtelise niiskuse graafikud CLT-paneeli ja Kingspan Therma TP10 vahelises kihis (kiht 2) erineva CLT-paneeli algniiskuse korral. Võrreldes Isover Vario InLineriga seestpoolt soojustatud tarindi suhtelise niiskuse graafikuga samas kihis (vt Joonis 5.25), on näha, et suhtelise niiskuse langemine toimub oluliselt pikema ajaperioodi jooksul. Sõltuvalt CLT-paneeli algniiskusest, toimub suhtelise niiskuse ühtlustumine 0,5-1,5 aastase ajaperioodi vältel.



Joonis 5.26. Hallitusindeksi väärtused erineva puidu algniiskuse korral seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis



Joonis 5.27. Suhtelise niiskuse väärtused erineva puidu algniiskuse korral seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis

6. TULEMUSTE ANALÜÜS

Lõputöö raames uuritud katseseinte mõõdetud ja arvutusmudelite abil arvutatud tulemuste keskmised erinevused jäid üldiselt mõõtevea piiridesse. Suhtelise niiskuse arvutuslike- ja katseliste tulemuste keskmine erinevus sõltuvalt katseseintest jäi piiridesse ±2..5%. (Wang & Ge, 2016) poolt läbi viidud uurimuses oli katse- ja arvutustarkvara Delphin 5.8.3 abil saadud arvutustulemuste vaheline suhtelise niiskuse väärtuste keskmine erinevus alla 2%. Suurim erinevus (2,7%) katse- ja arvutustulemuste vahel oli CLT-paneeli keskmises kihis ning väikseim CLT-paneeli pinnalähedases kihis, kus keskmiseks tulemuste erinevuseks saadi 0,5%. Võrreldes (Wang & Ge, 2016) saadud katse- ja arvutustulemuste keskmise erinevuse suurust, on antud uurimuse käigus saadud mõõte-ja arvutustulemuste erinevused samas suurusjärgus, välja arvatud teatud katseseinte üksikute kihtide tulemused. Suurem viga võib olla tingitud mudeldamise suuremast ebatäpsusest, materjaliomaduste suuremast varieeruvusest vm asjaoludest.

Arvutus- ja katsetulemused näitasid, et CLT-paneelid, mida eelnevalt basseinis niisutati, ei niiskunud ühtlaselt, vaid äärmised kihid olid suurema niiskussisaldusega kui keskmised kihid. See tegi arvutusmudelite täpsustamise protsessi keerulisemaks, kuna igale puidukihile tuli määrata erinev algniiskus. Kuigi CLT-paneele niisutati ühesugustes tingimustes, siis võib erinev algniiskus olla tingitud CLT-paneelide erinevast paiknemisest basseinis, kus üks paneel oli põhja kalde vms tõttu rohkem veega kaetud kui teine. Algniiskuse erinevus võib olla tingitud ka asjaolust, et õigetesse mõõtudesse lõikamine toimus CLT-paneelide niisutamise järgselt ning kuigi niisked paneelid olid kaetud kilega, siis katseseinte ehitus ning CLT-paneelide paigaldus seintesse ei toimunud kohe pärast niisutusprotsessi lõppu ning selle tulemusena võis teatud osa niiskusest juba enne seinte ehitust CLT-paneelidest välja kuivada. Erinevus võib olla tingitud ka CLT-paneeli kihtide ühendamiseks kasutatud liimi kõrgest suhtelisest difusioonitakistustegurist, kus liim toimis niiskust tõkestava kihina. Saadud tulemused kinnitasid ka (Wang & Ge, 2016) poolt saadud tulemusi, kus CLT-paneeli välimiste kihtide niiskus oli samuti kõrgem kui keskmistel kihtidel.

Katseseinte graafikutelt on näha, et muutuva difusioonitakistusega Isover Vario InLineriga seespoolselt soojustatud tarindi suhteline niiskus kihis 2 on madalam veeaurutiheda Kingspan Therma TP10-ga seespoolselt soojustatud tarindi suhtelisest niiskusest samas kihis. Sarnane tulemus saadi ka (Wang & Ge, 2016) poolt teostatud uurimuses, kus madala veeauruläbilaskvusega kihiga kaetud tarind oli niiskustehnilise toimivuse seisukohast riskantsem lahendus.

Arvutusmudeli tulemustest nähtub, et sõltuvalt seespoolse soojustusena kasutatud materjali omadustest on erinev CLT-paneeli maksimaalne lubatud algniiskus, mille puhul hallitust tarindis ei teki. Isover Vario InLineriga seespoolselt soojustatud tarindi puhul oli maksimaalseks algniiskuseks 17% ning Kingspan Therma TP10-ga seespoolselt soojustatud tarindi puhul 15%. Saadud väärtused on oluliselt madalamad (Wang & Ge, 2016) uurimuses esitatud kriteerium, kus hallituse teket vältivaks tingimuseks oli maksimaalseks niiskussisalduseks võetud 20%.

(Alev & Kalamees, 2016) leidsid aga teostatud uurimuses, et 50 mm paksuselt seestpoolt soojustatud palkseina niiskustehnilise toimivuse tagamiseks maksimaalne lubatud niiskus Põhjamaade kliimatingimustes on 12%. Käesoleba uurimuse käigus saadud tulemused paigutuvad ülaltoodud tulemuste vahele. Võrreldes lõputöös saadud tulemusi (Alev & Kalamees, 2016) poolt saadud maksimaalse lubatud niiskussisalduse väärtusega palkseinale, võib tulemuste erinevus olla tingitud seespoolse soojustuse erinevast paksusest, kus käesolevas töös uuritud katseseinte seespoolse soojustuse kihi paksus oli 25 ja 30 mm. Selgub, et kõrge difusioonitakistusega materjali mõju tarindi niiskustehnilisele toimivusele on negatiivsem kui muutuva difusioonitakistusega soojustusematerjali puhul.

Erineva seespoolse soojustusega katseseinte puhul erines ka arvutusperioodi algusaeg, millega arvutused maksimaalse algniiskuse leidmiseks teostati. Muutuva difusioonitakistusega kihiga Isover Vario InLiner soojustuse puhul oli kriitiliseimate tulemuste saamisel algusajaks detsember ning kõrge difusioonitakistusega Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustuse puhul oli algusajaks august. Kõige soodsam aeg arvutusperioodi alustamiseks, kus hallitusindeksi väärtused olid kõige madalamad, oli Isover Vario InLiner seespoolse soojustuse puhul juuni ning Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustuse puhul jaanuar. (Alev & Kalamees, 2016) leidsid seespoolse soojustusega palkseinte puhul, et soodsaim aeg tarindi soojustamiseks Põhjamaistes kliimatingimustes on juunikuu, mille puhul hallituse tekke risk tarindis oli kõige madalam. Võrreldes antud töös saadud tulemustega, siis muutuva difusioonitakistusega Isover Vario InLiner materjali puhul arvutustulemus soodsaima aja osas kinnitas (Alev & Kalamees, 2016) uurimuses toodud tulemusi. Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustusega tarindi puhul aga olid tulemused vastupidised eelolevas artiklis toodud tulemustele, kus suveperioodi lõpp osutus niiskustehnilise toimivuse seisukohast ebasoodsaimaks arvutuste algusajaks.

Isover Vario InLiner soojustusega tarindi ning Kingspan Therma TP10-ga kaetud seinte hallitusindeksite graafikute maksimaalsed väärtused on ühesuguse paneeli algniiskuse juures erinevad, hallitusindeksi väärtuste vahe ühesuguse algniiskuse korral on pea kahekordne. Saadud arvutustulemuste põhjal selgub, et kõrge difusioonitakistusega soojustusmaterjal Kingspan Therma TP10 on CLT-paneelidest konstruktsiooni seespoolseks soojustamiseks oluliselt riskantsem lahendus kui kasutades muutuva difusioonitakistusega kihiga kaetud jäika mineraalvillaplaati Isover Vario InLiner. Saadud tulemus kattub ka (Wang & Ge, 2016) uurimuse tulemustega, kus kõrge difusioonitakistusega materjaliga kaetud seintes oli niiskusprobleemide tekke oht kõrgem kui madala difusioonitakistusega materjaliga kaetud seintes oli niiskusprobleemide tekke oht

Arvutustulemused näitasid, et katsetatud seinatarindid on niiskustehnilise toimivuse seisukohast riskantsed lahendused, kuna hallituse tekke oht tekib seespoolse soojustuse ja CLT-paneeli vahelises kihis juba üsna madala CLT-paneeli algniiskuse juures ning sarnase tarindilahenduse puhul on oluline vältida CLT-paneelidesse liigse niiskuse sattumist.

Uurimuse käigus selgus, et CLT-paneeli lühiajalisel märjas keskkonnas viibimise korral niiskustase paneelis erineb CLT-paneelis kihiti, mistõttu edasistes uuringutes tuleks täpsemalt uurida niiskuse levimise kiirust CLT-paneelis ning kihtide ühendamiseks kasutatava liimi takistavat mõju niiskuse levikule CLT-paneelis.

7. JÄRELDUSED

Ristkihtliimpuidust seinatarind niiskustehnilise toimivuse osas, mis on lisaks välimisele soojustusele ka seespoolselt lisasoojustatud, võib välja tuua järgmised järeldused:

- 25 mm paksuse muutuva difusioonitakistusega Isover Vario InLiner seespoolse lisasoojustusega ning välimiselt poolelt 200mm paksuse mineraalvillaga soojustatud ristkihtliimpuidust seinatarindi niiskustehniline toimivus on tagatud kui paneeli algniiskus on maksimaalselt 17%;
- 30 mm paksuse kõrge difusioonitakistusega Kingspan Therma TP10 seespoolse lisasoojustusega ning välimiselt poolelt 200mm paksuse mineraalvillaga soojustatud ristkihtliimpuidust seinatarindi niiskustehniline toimivus on tagatud kui paneeli algniiskus on maksimaalselt 15%;
- CLT-paneelide lühiajalisel viibimisel märjas keskkonnas, ei märgu paneelid ühtlaselt, vaid paneelide välimised kihid on oluliselt niiskemad kui keskmised puidukihid;
- Muutuva difusioonitakistusega kihiga seespoolse soojustusmaterjali Isover Vario InLineri kasutamine võrreldes kõrge difusioonitakistusega seespoolse soojustusega Kingspan Therma TP10 on tarindi niiskustehnilise toimivuse seisukohalt ohutum lahendus;
- Suuremad hallitusindeksi arvutusväärtused muutuva difusioonitakistusega kihiga Isover Vario InLiner seespoolse soojustuse puhul saadakse, kui arvutusperioodi alustada detsembrikuust, mis tähendab et sel perioodil tarindit soojustades on oht hallituse tekkeks suurim;
- Väiksemad hallitusindeksi arvutusväärtused muutuva difusioonitakistusega kihiga Isover Vario InLiner seespoolse soojustuse puhul saadakse, kui arvutusperioodi alustada juunikuust, mis tähendab et sel perioodil tarindit soojustades on oht hallituse tekkeks väikseim;
- Suuremad hallitusindeksi arvutusväärtused kõrge difusioonitakistusega kihiga Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustuse puhul saadakse, kui arvutusperioodi alustada augustikuust, mis tähendab et sel perioodil tarindit soojustades on oht hallituse tekkeks suurim;
- Väiksemad hallitusindeksi arvutusväärtused kõrge difusioonitakistusega kihiga Kingspan Therma TP10 seespoolse soojustuse puhul saadakse, kui

arvutusperioodi alustada jaanuarikuust, mis tähendab et sel perioodil tarindit soojustades on oht hallituse tekkeks väikseim.

8. KASUTATUD KIRJANDUS

- Arumägi, E., Ilomets, S., Kalamees, T., & Tuisk, T. (2011). Field study of hygrothermal performance of log wall with internal thermal insulation - *Proceedings of the International Conference Durability of Building Materials and Components*: 2004 Porto, Portugal, 2011. 811–819
- Arumägi, E., Pihlak, M., & Kalamees, T. (2015). Reliability of interior thermal insulation as a retrofit measure in historic wooden apartment buildings in cold climate. *Energy Procedia*, 78, 871–876. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.010

Crosslam timber / CLT - External wall cladding examples. [WWW]. http://www.greenspec.co.uk/building-design/crosslam-external-walls/ (29.05.2018)

EVS 908-1: 2016. (2016). Hoone piirdetarindi soojusläbivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire. Tallinn: Standardiamet

EVS-EN 16351:2015. (2015). Puitkonstruktsioonid. Ristkihtliimpuit. Nõuded. Tallinn: Standardiamet

EVS-EN ISO 13788:2012. (2012). Hoone elementide ja piirdetarindite soojus- ja niiskustehniline toimivus. Kriitilise pinnaniiskuse ja elemendisisese kondenseerumise vältimine. Arvutusmeetodid. Tallinn: Standardiamet

Grunewald, J., Nicolai, A. 2005 – 2015. Delphin 5 User manual and program reference. Technische Universität Dresden

- Hukka, A., & Viitanen, H. A. (1999). A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33, 475 485
- Ilomets, S., Kalamees, T., & Vinha, J. (2017). Indoor hygrothermal loads for the deterministic and stochastic design of the building envelope for dwellings in cold climates. *Journal of Building Physics*, 41, 547 - 577 https://doi.org/10.1177/1744259117718442
- Kalamees, T., Paap, L., Kuusk, K., Mauring, T., Hallik, J., Valge, M., ... Tkaczyk, A. H. (2014). The first year's results from the first passive house in Estonia. *Proceedings of 10th Nordic Symposium on Building Physics*, 758–765.
- Karacabeyli, E., & Brad, D. (2013). *Handbook cross laminated timber*. *Book*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Kliimakamber energiatõhusate hoonete piirdetarindite ehitusfüüsikalisteks uuringuteks

ning hoonete energiatõhususe ja sisekliima uuringuteks. Vajaduse kirjeldus lähteülesanne. (2011). Tallinna Tehnikaülikool, Ehitusteaduskond

- Kosny, J., Asiz, A., Smith, I., Shrestha, S., & Fallahi, A. (2014). A review of high R -value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques. *Energy* & *Buildings*, 72, 441–456. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.004
- Kukk, V. (2016). Impact of cracks to the hygrothermal performance of cross laminate timber. 1-73
- McClung, R., Ge, H., Straube, J., & Wang, J. (2014). Hygrothermal performance of crosslaminated timber wall assemblies with built-in moisture: Field measurements and simulations. *Building and Environment*, 71, 95–110. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.09.008
- Othman, N. L., Jaafar, M., Harun, W. M. W., & Ibrahim, F. (2015). A Case Study on Moisture Problems and Building Defects. *Proceedia - Social and Behavioral Sciences*, 170, 27–36. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.011

Saarmann, E. & Veibri, U. (2006). Puiduteadus. Teine täiendtrükk, Tartu: Eesti Metsaselts

- Sontag, L., Nicolai, A., & Vogelsang, S. (2013). Validierung der Solverimplementierung des hygrothermischen Simulationsprogramms Delphin Inhaltsverzeichnis, 1–80.
- Viitanen, H., & Ojanen, T. (2007). Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X, Clearwater Beach, Florida, 8. https://doi.org/10.1177/1744259109343511
- Viitanen, H., Ojanen, T., & Peuhkuri, R. (2011). Mould growth modelling to evaluate durability of materials. *Proceedings of the 12DBMC - International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 12th - 15th April, 2011, Porto, Portugal 1–8. http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22377.pdf
- Wang, L., & Ge, H. (2016). Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies: A stochastic approach. *Building and Environment*, 97, 11–25. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.034

Katsesein	Anduri paiknemine tarindis	Anduri tüüp
CLT13MW	LAB_sisepind	TMC50-HD
	LAB_HF	Hukseflux HFP01
	LAB_kiht 1	Rotronic HC2-04
	LAB_kiht 2	Rotronic HC2-04
	LAB_kiht 3	Rotronic HC2-04
	LAB_kiht 4	Rotronic HC2-04
	LAB_kiht 5	Rotronic HC2-04
	LAB_välispind	TMC50-HD
CLT13PIR	LAB_sisepind	TMC50-HD
	LAB_HF	Hukseflux HFP01
	LAB_kiht 1	A-1 Humisense
	LAB_kiht 2	A-1 Humisense
	LAB_kiht 3	Rotronic HC2-04
	LAB_kiht 4	A-1 Humisense
	LAB_kiht 5	A-1 Humisense
	LAB_välispind	TMC50-HD
CLT20MW	LAB_sisepind	TMC50-HD
	LAB_HF	Hukseflux HFP01
	LAB_kiht 1	A-1 Humisense
	LAB_kiht 2	A-1 Humisense
	LAB_kiht 3	A-1 Humisense
	LAB_kiht 4	A-1 Humisense
	LAB_kiht 5	A-1 Humisense
	LAB_välispind	TMC50-HD
CLT20PIR	LAB_sisepind	TMC50-HD
	LAB_HF	Hukseflux HFP01
	LAB_kiht 1	A-1 Humisense
	LAB_kiht 2	A-1 Humisense
	LAB_kiht 3	A-1 Humisense
	LAB_kiht 4	A-1 Humisense
	LAB_kiht 5	A-1 Humisense
	LAB_välispind	TMC50-HD

Lisa 1. Andurite tüübid katseseinte erinevates kihtides

Lisa 2. Katseseinte CLT13MW ja CLT13PIR temperatuuri, suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu jaotus ristlõikes





Lisa 3. Katseseinte CLT20MW ja CLT20PIR temperatuuri, suhtelise niiskuse ja veeauru osarõhu jaotus ristlõikes

